

VISIT...

LANZAROTE  
*Caliente*.COM

Т. Н. АНДРИАНОВА, Б. В. ДЗАМПОВ,  
В. Н. ЗУБАРЕВ, С. А. РЕМИЗОВ

# СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ

*Под ред. проф. М. П. ВУКАЛОВИЧА*

*Допущено Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР в качестве  
учебного пособия для студентов  
теплоэнергетических специальностей вузов*

ИЗДАТЕЛЬСТВО „ЭНЕРГИЯ“  
МОСКВА 1964 ЛЕНИНГРАД

ЭТ-5-2  
УДК 621.036.7 (076.1)  
А 65

Задачник составлен в соответствии с программой курса «Техническая термодинамика» для теплотехнических и теплофизических специальностей энергетических вузов и факультетов.

Все задачи снабжены ответами, а наиболее типичные — подробными решениями.

Предлагаемый задачник предназначен в качестве учебного пособия для студентов теплотехнических и теплофизических специальностей энергетических вузов и факультетов и отвечает соответствующей программе курса «Техническая термодинамика». Задачник может быть использован при упражнениях на практических занятиях в аудитории и дома. Этой книгой могут пользоваться и студенты других, неэнергетических вузов.

*Андреева Тамара Николаевна, Дзямлов Борис Васильевич, Зубарев Владимир Николаевич, Ремизов Серафим Александрович*

**Сборник задач по технической термодинамике**

М.—Л., Издательство «Энергия», 1984, 200 с. с черт.

Темплан 1983 г. № 1

Редактор Л. Н. Синельникова

Техн. редактор Н. А. Бульдяк

Сдано в набор 24/X 1983 г.

Подписано к печати 15/II 1984 г.

T-00870

Бумага 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>

12,5 печ. л.

Уч. изд. л. 12

Тираж 25 000

Цена 47 коп.

Заказ 02

Московская типография № 10 Главполиграфпрома  
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати  
Шлюзовая наб., 10.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Работая над задачиком, авторы использовали свой опыт педагогической работы в Московском ордена Ленина энергетическом институте и расположили материал в такой последовательности, в какой обычно излагается программа курса в МЭИ.

Ввиду того что в Советском Союзе с 1 января 1963 г. введена как предпочтительная международная система единиц (СИ), большая часть задач дана в этой системе. Авторы испытывали затруднения, применяя ее, в связи с тем, что, составляя задачи, они не располагали нормативными материалами (таблицы и диаграммы водяного пара, таблицы термодинамических свойств газов и др.), оставленными по старой системе. Часть задач и ответов к ним даны в старых единицах, что авторы считают необходимым, учитывая сложность «переходного» периода. Сущность системы, ее положительные стороны и отличие от технической системы авторы постарались подчеркнуть в решениях некоторых задач раздела «Параметры состояния» и «Первый закон термодинамики».

Содержание некоторых разделов заметно отличается от того материала, который предлагался в ранее изданных задачниках. Так, составляя раздел «Реальные газы», авторы предложили задачи, дающие некоторые понятия о способах обработки экспериментального материала (применение метода конечных разностей, пользование таблицами и диаграммами обобщенных свойств веществ). Эти задачи могут быть полезными для студентов-теплофизиков. Задачи подобного типа могут быть предложены для домашних упражнений.

В разделе «Теплоемкость газов в идеальном состоянии» авторы сочли нужным поместить несколько простейших задач на вычисление теплоемкостей газов по формуле Эйнштейна, для того чтобы дать хотя бы некоторое представление о том, как вычисляются термодинамические функции при помощи квантовой теории теплоемкости.

В разделе «Влажный воздух» приведены задачи с применением  $i$ - $d$ -диаграммы для повышенных давлений воздуха.

В задачах разделов «Циклы газотурбинных установок и реактивных двигателей» и «Циклы паротурбинных установок» обращено внимание на влияние необратимости процессов на к. п. д. установок, а также помещены задачи, рассматривающие новые циклы парогазовых установок.

Авторы не сочли необходимым отдельно выделять тему «дифференциальные уравнения термодинамики» и решили применять эти уравнения в соответствующих разделах, там, где это необходимо.

Наиболее характерные задачи приведены с решениями.

Разделы 4, 8, 11 и 15 составлены Т. Н. Андриановой, разделы 2, 5 — Б. В. Дзамповым, разделы 3, 7, 10 и 13 — В. Н. Зубаревым, разделы 1, 6 и 9 — С. А. Ремизовым, раздел 14 — С. А. Ремизовым при участии Б. В. Дзампова, раздел 12 — Т. Н. Андриановой и Б. В. Дзамповым, раздел 16 — В. Н. Зубаревым и С. А. Ремизовым.

В конце книги, в приложениях, помещен необходимый справочный материал.

Авторы выражают благодарность коллективу кафедры теоретических основ теплотехники МЭИ, рецензенту В. С. Силецкому и титульному редактору М. П. Вукаловичу за целый ряд практических советов.

Авторы будут также благодарны всем читателям за критические замечания, которые позволят в будущем улучшить написанную ими книгу.

*Авторы*

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Предисловие . . . . .                                                        | 3   |
| Список основных обозначений . . . . .                                        | 6   |
| 1. Параметры состояния . . . . .                                             | 7   |
| 2. Первый закон термодинамики . . . . .                                      | 14  |
| 3. Законы и уравнение состояния идеальных газов . . . . .                    | 18  |
| 4. Теплоемкость газов в идеальном состоянии . . . . .                        | 24  |
| 5. Смеси идеальных газов . . . . .                                           | 31  |
| 6. Процессы изменения состояния идеальных газов . . . . .                    | 40  |
| 7. Второй закон термодинамики . . . . .                                      | 54  |
| 8. Реальные газы . . . . .                                                   | 67  |
| 9. Свойства воды и водяного пара; процессы изменения его состояния . . . . . | 82  |
| 10. Влажный воздух . . . . .                                                 | 97  |
| 11. Термодинамика газовых потоков . . . . .                                  | 106 |
| 12. Компрессоры; циклы двигателей внутреннего сгорания . . . . .             | 124 |
| 13. Циклы газотурбинных установок и реактивных двигателей . . . . .          | 130 |
| 14. Циклы паротурбинных установок . . . . .                                  | 141 |
| 15. Циклы холодильных машин . . . . .                                        | 157 |
| 16. Элементы термодинамики химических процессов . . . . .                    | 164 |
| Приложения . . . . .                                                         | 172 |
| Литература . . . . .                                                         | 200 |

---

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $m$  — масса, кг, кг·сек<sup>2</sup>/м, или массовый расход, кг/сек, кг/ч.  
 $G$  — вес, н, кг.  
 $\mu$  — молекулярный вес.  
 $\mu$  — масса одного киломоля, кг/кмоль.  
 $F$  — сила, н, кг.  
 $S$  — площадь, м<sup>2</sup>.  
 $h$  — высота, м.  
 $\tau$  — время, сек.  
 $g$  — ускорение силы тяжести, м/сек<sup>2</sup>.  
 $T$  — температура по шкале Кельвина, °К.  
 $t$  — температура по международной практической шкале 1948 г., °С.  
 $p$  — давление, н/м<sup>2</sup>; бар, кг/м<sup>2</sup>, кг/см<sup>2</sup>.  
 $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>.  
 $v$  — удельный объем, м<sup>3</sup>/кг.  
 $S; s$  — энтропия, кдж/кг·°К; ккал/°К, ккал/кг·°К.  
 $Q; q$  — тепло, кдж, кдж/кг, ккал, ккал/кг.  
 $U; u$  — внутренняя энергия, кдж, кдж/кг, ккал, ккал/кг.  
 $I; i$  — энтальпия, кдж, кдж/кг, ккал, ккал/кг.  
 $H$  — энтальпия, ккал/кмоль.  
 $L, l$  — работа, кдж, кдж/кг, кг·м, кг·м/кг.
- $N$  — мощность, вт, квт.  
 $c$  — удельная теплоемкость, кдж/кг·град.  
 $c'$  — удельная теплоемкость, кдж/м<sup>3</sup>·град.  
 $r$  — теплота парообразования, кдж/кг, ккал/кг.  
 $x$  — паросодержание (степень сухости пара).  
 $g$  — массовая доля.  
 $r$  — объемная (молярная) доля.  
 $d$  — влагосодержание влажного воздуха, г/кг с. в.  
 $c$  — скорость потока газа, м/сек.  
 $\eta_i$  — термический к. п. д. цикла.  
 $\eta_{oi}$  — относительный внутренний к. п. д.  
 $\eta_{oe}$  — относительный эффективный к. п. д.  
 $\eta_{ov}$  — относительный электрический к. п. д.  
 $\eta_i$  — внутренний к. п. д.  
 $\alpha_i$  — дифференциальный адиабатический дроссель-эффект, град /  $\frac{кг}{см^2}$ .  
 $\varepsilon$  — степень сжатия.  
 $\beta$  — степень повышения давления.  
 $p$  — степень предварительного расширения.  
 $\varepsilon$  — холодильный коэффициент.  
 $\Theta$  — характеристическая температура, °К.

## 1. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ

1-1. Слиток свинца, имеющего плотность  $\rho = 11,3 \text{ г/см}^3$ , объемом  $V = 1 \text{ дм}^3$ , взвешен при помощи пружинных весов на полюсе, где ускорение силы тяжести  $g_{90^\circ} = 9,8324 \text{ м/сек}^2$ .

Каков вес свинца, выраженный в ньютонах и в килограммах-сила? Что покажут пружинные весы на экваторе, где  $g_0 = 9,7805 \text{ м/сек}^2$ ?

### Решение

Согласно второму закону Ньютона вес (т. е. сила притяжения тела к земле) равен:

$$G = mg.$$

Определяя его в международной системе единиц СИ (ГОСТ 9867-61), получим, учитывая, что  $m = \rho V$ :

$$G_{90^\circ} = \rho \text{ кг/м}^3 \cdot V \text{ м}^3 \cdot g_{90^\circ} \text{ м/сек}^2 = 11\,300 \cdot 0,001 \cdot 9,8324 = 111,11 \text{ н.}$$

Прежде чем подсчитать вес в килограммах-сила (кгс или кг), необходимо вспомнить, что эта единица была установлена в системе механических единиц МКГСС (метр — килограмм-сила — секунда) на основании того же второго закона Ньютона. За 1 кг была принята такая сила, с которой тело, имеющее массу, равную массе международного прототипа килограмма, притягивается к земле при так называемом «нормальном» ускорении<sup>1</sup> силы тяжести  $g_n = 9,80665 \text{ м/сек}^2$ . При этом техническая единица массы получила сложную размерность: 1 т. е. м. = 1 кг · сек<sup>2</sup>/м.

Нетрудно сообразить, что 1 кг эквивалентен  $9,80665 \text{ кг} \cdot \text{м/сек}^2 = 9,80665 \text{ н}$ , а 1 т. е. м. = 1 кг · сек<sup>2</sup>/м эквивалентна 9,80665 кг. Следовательно, для того чтобы найти вес  $G$  кг, нужно вес в ньютонах разделить на величину  $9,80665 \text{ н/кг}$ , которая лишь численно равна нормальному ускорению силы тяжести, а по своему существу оказывается всего лишь переводным коэффициентом для перехода из одной системы единиц в другую. Так же обстоит дело и с единицами массы.

<sup>1</sup> Нормальное ускорение  $g_n$  имеет место на географической широте  $\varphi$ , близкой к  $45^\circ$ , на уровне океана.



Вес свинца, выраженный по системе МКГСС, будет равен:

$$G_{90} = \frac{111,11 \text{ н}}{9,80665 \text{ н/кг}} = 11,333 \text{ кг}.$$

Для случая измерения веса на экваторе получим соответственно:

$$G_0 = 110,52 \text{ н, или } 11,270 \text{ кг}.$$

Пример показывает, что вес вещества зависит от ускорения силы тяжести, различного в разных точках земной поверхности и на разных высотах от уровня океана.

Ясным становится и то, что величина, называемая «удельным весом» ( $\gamma$ , н/м<sup>3</sup>, или кг/м<sup>3</sup>), по той же причине не может служить табличной величиной. Приводимые в многочисленных таблицах физических свойств веществ, составленных по опытным данным, значения  $\gamma$  всегда приведены к нормальному ускорению силы тяжести, если взвешивание в опыте произведено при помощи пружинных динамометров той или иной конструкции. При этом удельный вес  $\gamma$  численно становится равным массе вещества  $\rho$ .

При пользовании системой единиц СИ в подавляющем большинстве случаев употребляется величина  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, и обратная ей величина — «удельный объем» (объем единицы массы)  $v = 1/\rho$ , м<sup>3</sup>/кг.

1-2. Определить силу  $F$ , приложенную к горизонтальной плоской площадке  $S=4 \text{ см}^2$  (рис. 1-1), находящуюся под столбом воды высотой  $h=10 \text{ м}$ . Измерение  $h$  произведено в Баку (географическая широта  $\varphi=40^\circ 20'$ ) на уровне океана при барометрическом давлении  $B=1010 \text{ мбар}$  (миллибар) и при температуре окружающего воздуха  $t=20^\circ \text{С}$ . Вода, имеющая ту же температуру, обладает плотностью  $\rho=0,9982 \text{ г/см}^3$ .

Рис 1-1. К задаче 1-2.

Какой будет эта сила, если опыт поставить в Мурманске ( $\varphi=69^\circ$ ) при тех же прочих условиях?

Ускорение силы тяжести  $g_\varphi$ , зависящее от географической широты  $\varphi$  точки земной поверхности, можно подсчитать по приближенной формуле

$$g_\varphi = 9,80665 (1 + 0,0026 \cos 2\varphi), \text{ м/сек}^2.$$

Ответ: В Баку — 79,54 н; в Мурманске — 79,63 н.

1-3. Манометр, установленный в открытой кабине самолета, находящегося на земле, и измеряющий давление масла, показывает  $6 \text{ кг/см}^2$  при показании барометра 752 мм рт. ст.

1) Каково абсолютное давление масла, выраженное в н/м<sup>2</sup>, в бар, в кг/м<sup>2</sup>, в кг/см<sup>2</sup>, в мм рт. ст., в мм вод. ст., в lb/sq.in?

2) Каково будет показание манометра, выраженное в этих же единицах, после подъема самолета на некоторую высоту, где атмосферное давление  $B=0,590 \text{ бар}$ , если абсолютное давление остается неизменным?

Ускорение силы тяжести считать нормальным ( $g_n = 9,80665 \text{ м/сек}^2$ ) и не зависящим от высоты подъема самолета. Плотности ртути и воды принимать, соответственно, при  $0^\circ \text{C}$  и  $4^\circ \text{C}$  \*.

Ответ: 1)  $\rho = 6,89 \cdot 10^3 \text{ н/м}^2 = 6,89 \text{ бар} = 70 \text{ 223 кГ/м}^2 = 7,02 \text{ кГ/см}^2 = 5 \text{ 165 мм рт. ст.} = 70 \text{ 223 мм вод. ст.} = 99,9 \text{ lb/sq.in.}$

2)  $\rho_{\text{раз}} = 6,297 \cdot 10^3 \text{ н/м}^2 = 6,297 \text{ бар} = 6,421 \cdot 10^4 \text{ кГ/м}^2 = 6,421 \text{ кГ/см}^2 = 4 \text{ 723 мм рт. ст.} = 6,421 \cdot 10^4 \text{ мм вод. ст.} = 91,3 \text{ lb/sq.in.}$

1-4. Для точного измерения давлений или для проверки образцовых пружинных манометров применяются грузопоршневые манометры системы Индрика.

Устройство такого манометра показано на схематическом чертеже рис. 1-2.

В измерительной колонке 1 имеется канал, в котором ходит притертый поршень 2 малого диаметра. С поршнем соединена грузоприемная тарелка 3, на которую накладываются грузы, точный вес которых известен. Внутренние полости манометра заполняются касторовым маслом через штуцер 7. Штуцер 4 служит для соединения со средой, давление которой измеряется. Штуцер 5 предназначен для присоединения проверяемых манометров. Давление во внутренних полостях манометра может быть создано при помощи прессы 6.

Определить абсолютное давление в исследуемой среде, если в состоянии равновесия на тарелке оказалось пять грузов по 5 кг, два груза по 1 кг и 550 г мелкого разно-веса.

Барометр показывает  $B = 746 \text{ мм рт. ст.}$  Площадь поршня  $2 - f = 0,05 \text{ см}^2$ .

Ответ:  $p = 54 \text{ 134 кн/м}^2 = 541,34 \text{ бар} = 552,01 \text{ кГ/см}^2$ .

1-5. В конденсаторе паровой турбины поддерживается абсолютное давление  $p = 0,04 \text{ кГ/см}^2$ . Каковы показания вакуумметров, градуированных в  $\text{кн/м}^2$  и в  $\text{мм рт. ст.}$ , если в одном случае показания барометра составляют  $735 \text{ мм рт. ст.}$ , а в другом —  $764 \text{ мм рт. ст.}$ ?

Чему равны показания вакуумметра в этих же условиях, если его шкала проградуирована в английских фунтах на квадратный дюйм?

Ответ: 1)  $P_{\text{вак}} = 94,06 \text{ кн/м}^2 = 706 \text{ мм рт. ст.} = 13,64 \text{ lb/sq.in.}$

2)  $P_{\text{вак}} = 97,93 \text{ кн/м}^2 = 735 \text{ мм рт. ст.} = 14,20 \text{ lb/sq.in.}$

1-6. Для измерения малых избыточных давлений или небольших разрежений употребляются микроманометры.

Принципиальная схема этого прибора представлена на рис. 1-3.

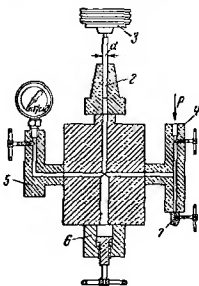


Рис. 1-2. К задаче 1-4.

\* Эти же условия ( $g = g_n$ ;  $P_{\text{рт}} = P_{\text{рт}, 0^\circ \text{C}}$ ;  $\rho_{\text{воды}} = \rho_{\text{воды}, 4^\circ \text{C}}$  следует принимать в последующих задачах, если не делается специальных указаний.

Определить абсолютное давление в воздухопроводе, если длина  $l$  столба жидкости в трубке микроманометра, наклоненной под углом  $\alpha = 30^\circ$ , равна 180 мм.

Рабочая жидкость - спирт с плотностью  $\rho = 0,8 \text{ г/см}^3$ .

Показание барометра  $B = 1020 \text{ мм рт. ст.}$  Давление выразить в бар, мм рт. ст. и  $\text{кг/см}^2$ .

Ответ:  $p_{\text{абс}} = 1,027 \text{ бар} = 770 \text{ мм рт. ст.} = 1,047 \text{ кг/см}^2$ .

1-7. Для измерения расхода жидкостей и газов употребляются дроссельные диафрагмы. Схема измерения (рис. 1-4) такова.

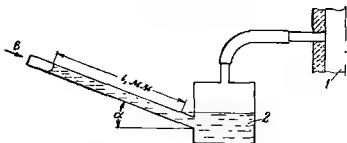
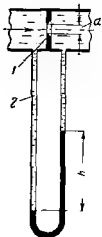


Рис 1-3 К задаче 1-6.

1 — воздухопровод. 2 — микроманометр, заполненный спиртом

Текучая по трубе жидкость проходит через дроссельную диафрагму 1. В результате дросселирования давление за диафрагмой оказывается меньшим, чем давление перед ней. Перепад давления на диафрагме измеряется дифференциальным U-образным манометром 2. Массовый расход жидкости подсчитывается по формуле вида:



$$m_{\text{сек}} = k f \sqrt{2 \Delta p \rho}, \text{ кг/сек},$$

где  $m_{\text{сек}}$  — искомый массовый расход [жидкости, кг/сек];

$k$  — постоянный коэффициент;

$f$  — площадь входного отверстия диафрагмы,  $\text{м}^2$ ;

$\Delta p$  — перепад давления на диафрагме,  $\text{н/м}^2$ ;

$\rho$  — плотность текущей жидкости,  $\text{кг/м}^3$ .

Определить часовой расход воды, измеренный при помощи этого устройства, если  $k = 0,8$ ;  $\rho = 0,998 \text{ г/см}^3$ ; показание дифференциального манометра  $h = 22 \text{ мм рт. ст.}$ ; диаметр входного отверстия диафрагмы  $d = 10 \text{ мм}$ .

Рис 1-4 К задаче 1-7.

Какова будет ошибка в расчете в процентах и в какую сторону, если не учитывать веса столба воды над ртутью в левой половине дифференциального манометра?

Ответ:  $m_{\text{сек}} = 527 \text{ кг/ч}$ . Ошибка в сторону преувеличения на 3,9%.

1-8. В паросборнике находится водяной пар в количестве 300 кг. Определить объем паросборника  $V$ ,  $\text{м}^3$ , если удельный объем пара  $\nu = 20,2 \text{ см}^3/\text{г}$ .

Ответ:  $V = 60,6 \text{ м}^3$ .

1-9. Связь между международной практической шкалой температур 1948 г (в градусах Цельсия и Кельвина) и шкалой Фаренгейта показана в виде схемы на рис. 1-5.

Вывести самостоятельно формулы для взаимного пересчета показаний термометров с этими шкалами

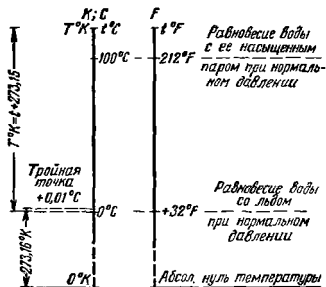


Рис. 1-5. К задаче 1-9.

1-10. Перевести в  $^{\circ}\text{C}$  следующие температуры, измеренные термометром со шкалой Фаренгейта:

$-275^{\circ}\text{F}$ ,  $24^{\circ}\text{F}$ ,  $162^{\circ}\text{F}$ ,  $1463^{\circ}\text{F}$

Перевести в  $^{\circ}\text{F}$  следующие температуры, измеренные в градусах Цельсия:

$-186^{\circ}\text{C}$ ;  $-12^{\circ}\text{C}$ ;  $127^{\circ}\text{C}$ ,  $893^{\circ}\text{C}$

Ответ: 1)  $-170,6^{\circ}\text{C}$ ;  $-4,41^{\circ}\text{C}$ ;  $72,2^{\circ}\text{C}$ ,  $796^{\circ}\text{C}$ .

2)  $302,8^{\circ}\text{F}$ ;  $10,40^{\circ}\text{F}$ ;  $260,6^{\circ}\text{F}$ ;  $1639^{\circ}\text{F}$ .

1-11. Нанизшая температура воздуха, зафиксированная в Антарктике, составляет  $-84^{\circ}\text{C}$  (по данным 1960 г)

Выразить ее в градусах Фаренгейта.

Ответ:  $-119,2^{\circ}\text{F}$

1-12. При установлении своей шкалы Фаренгейт принял за  $100^{\circ}$  нормальную температуру человеческого тела. Какова, по мнению Фаренгейта, эта температура в  $^{\circ}\text{C}$ ?

Ответ:  $37,8^{\circ}\text{C}$ .

1-13. Какова температура абсолютного нуля по шкале Фаренгейта?

Ответ:  $-459,67^{\circ}\text{F}$ .

1-14. При проведении технических и научных работ часто измеряется непосредственно разность температур (например, при помощи дифференциальных термодпар).

Какова разность температур по международной практической шкале (в градусах Цельсия), если по шкале Фаренгейта она составляет  $\Delta t = 215^\circ \text{F}$ ?

Ответ:  $\Delta t = 119,44^\circ \text{C}$ .

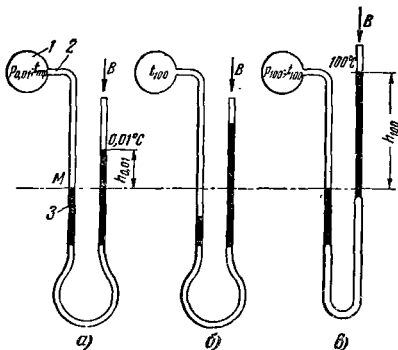


Рис. 1-6 К задаче 1-17.

1-15. В США употребляется абсолютная шкала Рэнкина<sup>1</sup>, в которой за нуль принята температура абсолютного нуля, а цена деления такая же, как и цена деления шкалы Фаренгейта. Какова температура  $t$  по этой абсолютной шкале, если известно, что  $t = 520^\circ \text{C}$ ?

Ответ:  $1\,428^\circ \text{Ra}$ .

1-16. Термометры показывают  $315^\circ \text{C}$  и  $-440^\circ \text{F}$ . Каковы в этих случаях значения абсолютных температур в шкалах Кельвина и Рэнкина?

Ответ: 1)  $t = 588,15^\circ \text{K} = 1058,67^\circ \text{Ra}$ .

2)  $t = 10,93^\circ \text{K} = 19,67^\circ \text{Ra}$ .

1-17. Для построения температурных шкал и иногда для непосредственных измерений употребляются гелиевые газовые термометры постоянного объема.

Схема такого термометра изображена на рис. 1-6.

Баллон 1 заполнен гелием при некотором положительном избыточном давлении. Этот баллон соединен трубкой 2 с U-образным манометром 3, правое, открытое колено которого подвижно.

<sup>1</sup> Температура по этой шкале обозначается  $^\circ \text{Ra}$ .

В положении *a* баллон находится в среде с температурой  $t_{\text{тр}}$  тройной точки воды\*. При этом положение мениска ртути в левом колене соответствует точке 0,01 на шкале термометра.

Если теперь баллон *I* поместить в среду с парами кипящей воды при  $p_{\text{н}} = 101\,325 \text{ н/м}^2$ , то давление гелия в баллоне возрастет, мениск ртути в левом колене опустится, а в правом поднимется (положение б). Чтобы соблюсти постоянство объема в процессе изменения состояния гелия, необходимо поднять мениск ртути в левом колене до исходного уровня *M* (положение в). Тогда положение мениска ртути в правом колене будет соответствовать второй опорной точке международной практической шкалы температур 1948 г. — точке 100.

Подобным же образом фиксируются показания термометра при других постоянных температурах: температуре кипения кислорода, кипения серы (или затвердевания цинка), затвердевания серебра и золота (все температуры — при нормальном давлении). Для максимального приближения к термодинамической шкале температур вводятся поправки на отклонения свойств гелия от идеального газа. Для интерполяции шкалы существуют специальные приборы и расчетные формулы.

На основании опыта с гелиевым газовым термометром при  $V = \text{const}$  определить температуру  $t_0^\circ \text{C}$  абсолютного нуля в градусах международной практической температурной шкалы 1948 г. (градусы Цельсия).

Найдено, что при температуре в тройной точке  $t_{\text{тр}} = 0,01^\circ \text{C}$  перепад давления  $h_{0,01} = 1\,000 \text{ мм рт. ст.}$ , а при температуре кипения воды  $t = 100^\circ \text{C}$   $h_{100} = 1\,644,25 \text{ мм рт. ст.}$

Показания барометра  $B = 760 \text{ мм рт. ст.}$

### Решение

Абсолютная температура  $T^\circ \text{K}$  связана с температурой следующим соотношением:

$$T = t + (-t_0), \text{ } ^\circ \text{K}.$$

Для нахождения искомой  $t_0$  воспользуемся законом Гей-Люссака:

$$\frac{p_{0,01}}{p_{100}} = \frac{T_{\text{тр}}}{T_{100}} = \frac{0,01 - t_0}{100 - t_0},$$

где

$$p_{0,01} = h_{0,01} + B = 1\,000 + 760 = 1\,760 \text{ мм рт. ст.};$$

$$p_{100} = h_{100} + B = 1\,644,25 + 760 = 2\,404,25 \text{ мм рт. ст.}$$

Таким образом,

$$p_{0,01} (100 - t_0) = p_{100} (0,01 - t_0).$$

\* Тройной точкой определяется такое состояние вещества, при котором сосуществуют и находятся в равновесии все три фазы его: жидкая, твердая и газообразная. Для воды абсолютное давление в тройной точке  $p_{\text{тр}} = 0,006228 \text{ кГ/см}^2$  и температура  $t_{\text{тр}} = 0,01^\circ \text{C}$ . Согласно ГОСТ 8550-61 температура тройной точки воды принята за одну из основных опорных точек международной практической шкалы температур 1948 г.

откуда

$$t = \frac{100 p_{0,01} - 0,01 p_{100}}{p_{0,01} - p_{100}} = \frac{100 \cdot 1760,00 - 0,01 \cdot 2404,25}{1760,00 - 2404,25} = -273,15^\circ \text{C}.$$

1-18. Определить перепад давления  $h$  в U образной трубке 3 (рис. 1.6) газового термометра постоянного объема после помещения рабочего баллона 1 в пары кипящего кислорода (находящиеся в равновесии с жидким кислородом при нормальном давлении) и приведения термометра в положение в. Температура этих паров (температура кипения кислорода)  $t = -182,97^\circ \text{C}$  является одной из опорных точек международной практической шкалы температур. Перепад давления при температуре в тройной точке воды  $h_{0,01} = 133,322 \text{ кН/м}^2$ . Барометрическое давление  $B = 1013,25 \text{ мбар}$ .

Ответ: В баллоне образуется вакуум.

$$p_{\text{вак}} = 179 \text{ мм рт. ст.}$$

## 2. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

2-1. Выразить теплоемкость  $c_p = 0,547 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$  в килджоулях.

Ответ:  $c_p = 2,289 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$

2-2. До сих пор во многих странах применяется британская тепловая единица  $BTU$ . Она определяется как количество тепла, необходимое для нагревания одного английского фунта воды на  $1^\circ \text{F}$ .

Выразить  $1 \text{ BTU}$ ,  $1 \text{ BTU/lb}$  и  $1 \text{ BTU/lb} \cdot ^\circ \text{F}$  соответственно в  $\text{кДж}$ ,  $\text{ккал}$ ,  $\text{кДж/кг}$ ,  $\text{ккал/кг}$ ,  $\text{кДж/кг} \cdot \text{град}$  и  $\text{ккал/кг} \cdot \text{град}$ , приняв во внимание, что  $1 \text{ англ. фунт (1 lb)}$  равен  $0,45359 \text{ кг}$ .

Ответ:  $1 \text{ BTU} = 1,055 \text{ кДж} = 0,252 \text{ ккал}$ ;  $1 \text{ BTU/lb} = 2,326 \text{ кДж/кг} = 0,556 \text{ ккал/кг}$ ;  $1 \text{ BTU/lb} \cdot ^\circ \text{F} = 4,187 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град} = 1,000 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$ .

2-3. В калориметры, содержащих по  $0,500 \text{ кг}$  воды при температуре  $30^\circ \text{C}$ , опускают образцы металлов весом по  $0,500 \text{ кг}$ . Температура каждого образца равна  $150,0^\circ \text{C}$ . После того как были опущены образцы серебра, стали и магния, температура в соответствующих калориметрах оказалась равной  $37,3^\circ \text{C}$ ,  $42,1^\circ \text{C}$  и  $54,0^\circ \text{C}$ .

Определить теплоемкости металлов, пренебрегая массой калориметров.

Ответ:  $c_{\text{Ag}} = 0,271 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град} = 0,065 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$ ;

$c_{\text{ст}} = 0,469 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град} = 0,112 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$ ;

$c_{\text{Mg}} = 1,047 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град} = 0,250 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$ .

2-4. Стальной образец массой  $0,2 \text{ кг}$  долгое время выдерживается в нагревательной печи. Затем он быстро опускается в калориметр с  $0,5 \text{ кг}$  воды при  $t = 20^\circ \text{C}$ . Температура воды в калориметре после установления равновесного состояния становится равной  $75^\circ \text{C}$ .

Какова температура в нагревательной печи? Теплоемкость образца взять из ответа на предыдущую задачу.

Ответ:  $1291^\circ \text{C}$

2-5. Выразить  $1 \text{ квт} \cdot \text{ч}$  и  $1 \text{ л. с.} \cdot \text{ч}$  (лошадиная сила-час) в килджоулях, килокалориях, килограммометрах и киллоджоулях.

Ответ: См. приложение, табл. 7.

2-6. Мощность станции на выходных шинах составляет 12 Мвт. Какое количество топлива  $B$ , кг/ч, сжигается в топках котлов электростанции, если все потери энергии на станции составляют 70%, а теплота сгорания топлива  $Q_H^P = 6\,700$  ккал/кг?

Ответ:  $B = 5,14$  т/ч.

2-7. Определить суточный расход топлива на станции мощностью  $N = 100\,000$  кВт, если ее к. п. д.  $\eta_{от} = 0,35$ , а теплота сгорания топлива  $Q_H^P = 30\,000$  кДж/кг.

Определить также удельный расход топлива  $b$  на 1 МДж выработанной энергии

Ответ:  $B_{сут} = 823$  т/сутки;  $b = 0,0953$  кг/МДж.

2-8. Сколько килограммов свинца можно нагреть от температуры  $15^\circ\text{C}$  до температуры его плавления  $t = 327^\circ\text{C}$  посредством удара молота массой в 200 кг при падении его с высоты 2 м, если считать, что вся энергия падения молота превращается в тепло, которое целиком поглощается свинцом? Теплоемкость свинца  $c_{Pb} = 0,1200$  кДж/кг  $\cdot$  град

Ответ: 0,0969 кг

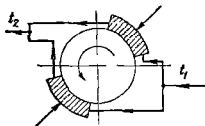


Рис 2-1 К задаче 2-9.

2-9. При испытании двигателей для определения мощности необходимо их затормаживать (рис 2-1). При этом работа, произведенная двигателем, расходуется на преодоление сил трения и превращается в тепло, часть которого ( $\sim 20\%$ ) рассеивается в окружающей среде, а остальная часть отводится охлаждающей тормоз водой

Сколько воды необходимо подводить к тормозу за 1 ч, если его крутящий момент  $M_{кр} = 2\,000$  дж, число оборотов  $n = 1\,500$  об/мин, а допустимое повышение температуры воды равно  $\Delta t = 33^\circ\text{C}$ ? Теплоемкость воды принять равной  $c = 1$  ккал/кг  $\cdot$  град.

### Решение

Мощность двигателя целиком переходит в тепло трения, выделяемое в единицу времени, а 80% этого тепла поглощается водой. Поэтому энергетический баланс можно записать так:

$$0,80N = m_w c \Delta t,$$

где  $m_w$  — массовый расход воды, кг/сек;

$c$  — ее теплоемкость, дж/кг  $\cdot$  град,

$$N = \frac{2\pi n M_{кр}}{60} \text{ — мощность двигателя, вт.}$$

Отсюда

$$m_w = \frac{2\pi n M_{кр} \cdot 0,80}{60 c \Delta t} = \frac{6,2832 \cdot 1\,500 \cdot 2\,000 \cdot 0,80}{60 \cdot 4,1868 \cdot 10^3 \cdot 35} = 1,717 \text{ кг/сек} \approx 6\,180 \text{ кг/ч.}$$



2-10. При торможении двигателя охлаждающая тормозные колодки вода нагревается на  $30^{\circ}\text{C}$ . Расход воды составляет  $m_a = 1500 \text{ кг/ч}$ .

Определить мощность двигателя  $N$ , кВт, если 25% тепла трения рассеивается в окружающую среду.

Ответ:  $N = 69,8 \text{ кВт}$ .

2-11. Испытание двигателя ведется с помощью присоединенного к нему генератора. Напряжение на клеммах генератора постоянного тока  $U = 220 \text{ в}$ , сила тока  $I = 50 \text{ а}$ , к п. д. генератора  $\eta_r = 0,98$ .

Определить мощность двигателя в кВт

Ответ:  $N = 11,2 \text{ кВт}$ .

2-12. Для определения теплоемкости масла используется калориметр, принципиальная схема которого представлена на рис 2-2.

В опыте с таким калориметром получены следующие данные: падение напряжения на нагревателе  $\Delta U = 43 \text{ в}$ ; сила тока  $I = 6 \text{ а}$ . За время опыта  $\tau = 12 \text{ мин}$  температура масла (масса которого  $m = 3 \text{ кг}$ ) возросла на  $\Delta t = 18 \text{ град}$ .

Ранее, специально проведенным опытом было найдено так называемое тепловое значение  $A$  собственно калориметра, т. е. то количество энергии, которое нужно сообщить калориметрическому сосуду, мешалке и термометру, для того чтобы нагреть всю эту калориметрическую систему на  $1 \text{ град}$ . Оказалось, что  $A = 3120 \text{ дж/град}$ .

Какова теплоемкость масла?

Ответ:  $c = 2400 \text{ дж/кг} \cdot \text{град} = 0,573 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$ .

2-13. Мешалка калориметра (рис 2-2) приводится в движение серводвигателем типа Уоррена мощностью  $N = 10 \text{ вт}$ .

Следует ли при подсчете теплоемкости масла учитывать джоулево тепло, возникающее в результате трения лопастной мешалки о масло, если считать, что маслу передается половина энергии, потребляемой двигателем, и если суммарная погрешность калориметрического опыта равна  $\pm 0,1\%$ ? Условия опыта такие же, как в задаче 2-12.

Ответ: Следует, потому что тепло, вносимое нагревателем, составляет  $3440 \text{ дж/кг} \cdot \text{град}$ , а джоулево тепло мешалки равно  $67 \text{ дж/кг} \cdot \text{град}$ , что составляет  $1,9\%$ .

2-14. Работа расширения  $0,5 \text{ кг}$  газа составляет  $L = 110 \text{ кдж}$ . При этом от газа отнимается  $10 \text{ ккал}$  тепла.

Как изменится удельная (на  $1 \text{ кг}$ ) внутренняя энергия в результате совершения процесса?

Ответ: Внутренняя энергия уменьшилась на  $103,7 \text{ кдж/кг}$ .

2-15. При температуре  $t = 0,01^{\circ}\text{C}$  и давлении  $p = 0,006228 \text{ кг/см}^2$  (тройная точка) энтальпия воды принимается равной нулю. Чему равна при этих условиях внутренняя энергия  $u'$  воды?

## Решение

В соответствии с определением энтальпии можно записать:  $i = u + pv$ . Отсюда внутренняя энергия воды в тройной точке

$$u' = i' - pv',$$

так как  $i' = 0$ , то

$$u' = -pv'.$$

Рассчитаем значение  $u'$  в единицах СИ:

$$u' = -0,006228 \text{ кг/см}^2 \cdot 98066,5 \frac{\text{н}}{\text{м}^2} \bigg/ \frac{\text{кг}}{\text{см}^3} \cdot 0,0010002 \text{ м}^3/\text{кг} = \\ = -0,6109 \text{ Дж/кг}.$$

Эта же величина в килокалориях:

$$u' = \frac{-0,6109}{4,1868} \cdot 10^{-3} = -0,1460 \cdot 10^{-3} \text{ ккал/кг}.$$

Здесь  $98066,5 \frac{\text{н}}{\text{м}^2} \bigg/ \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$  и  $4,1868 \text{ Дж/кал}$  — переводные коэффициенты;

$0,0010002 \text{ м}^3/\text{кг} = v'$  — удельный объем воды в тройной точке, взятый из таблиц воды и водяного пара.

Проведем этот же расчет в системе МКГСС:

$$u' = -0,006228 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^2 \cdot 0,0010002 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot 9,80665 \text{ кг/т. е. м.} = \\ = -0,6109 \text{ кг} \cdot \text{м/т. е. м}$$

или в килокалориях:

$$u' = -\frac{0,6109}{426,94} = -1,431 \cdot 10^{-3} \text{ ккал/т. е. м},$$

где  $426,94 \text{ кг} \cdot \text{м/ккал}$  — механический эквивалент теплоты.

Последний результат получился вполне закономерным, так как  $1 \text{ т. е. м}$  в  $9,80665$  раз крупнее, чем  $1 \text{ кг}$ .

По поводу приведенного выше решения следует сделать следующие замечания.

В технической практике единица массы, равная  $1 \text{ т. е. м.}$ , не привилась, ею почти никогда не пользуются. В расчетах при пользовании системой МКГСС все удельные величины относят, как правило, не к  $1 \text{ т. е. м.}$ , а к  $1$  килограмму-массе, смешивая тем самым две различные системы единиц. Запись же ведут следующим образом: либо, например,

$$l = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/кг}; c_p = 1 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}; v = 1 \text{ м}^3/\text{кг} \text{ и т. д.}$$

либо

$$l = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/кг}; c_p = 1 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}; v = 1 \text{ м}^3/\text{кг} \text{ и т. д.}$$

И ту и другую форму записи следует признать несостоятельными. В первом случае запись подчеркивает недопустимое смешение различных систем единиц измерения. Во втором случае формаль-

ного нарушения не делается, но искажается физический смысл величин: невозможно представить себе работу в  $\text{кг} \cdot \text{м}$ , тепло в  $\text{ккал}$ , отнесенными к единице силы ( $\text{кг}$ ), или объем, принадлежащий единице силы.

Мы пришли к выводу, что до введения системы СИ в технических расчетах не применялась никакая-либо единая система единиц (например, МКГСС), а смешивались две системы: МКГСС (метр—килограмм—сила—секунда) и МКС (метр—килограмм—масса—секунда). Такое, в сущности, незаконное смешение приводило часто к недоразумениям и ошибкам в расчетах.

Введение единой международной системы СИ устраняет все эти недоразумения.

**2-16.** При температуре  $t_0 = 0^\circ \text{C}$  и абсолютном давлении  $p_0 = 1 \text{ кг/см}^2$  энтальпия кислорода  $\text{O}_2$  принимается равной нулю.

Чему равна в этих условиях внутренняя энергия этого же газа?

**Ответ:**  $u_0 = -70,9 \text{ кдж/кг}$ .

Указание. воспользоваться уравнением состояния идеального газа.

**2-17.** Важнейшей характеристикой работы двигателя является отношение количества выработанной энергии к количеству энергии, которое выделяет топливо, потребляемое двигателем. Это отношение называется коэффициентом полезного действия двигателя  $\eta$ .

Определить к.п.д. автомобильного двигателя в 60 л. с при часовом расходе топлива в  $7,4 \text{ кг/ч}$ . Теплоту сгорания топлива принять равной  $10\,000 \text{ ккал/кг}$ .

**Ответ:**  $\eta = 0,512$ .

**2-18.** На электростанции мощностью  $N = 100 \text{ Мвт}$  сжигается топливо с теплотой сгорания  $Q_{\text{н}}^{\text{P}} = 30\,000 \text{ кдж/кг}$ . Коэффициент полезного действия станции  $\eta_{\text{ст}} = 33,0\%$ .

Определить часовую расход топлива  $B$ .

**Ответ:**  $B = 36,4 \text{ т/ч}$ .

**2-19.** Паровая турбина расходует  $0,00110 \text{ кг}$  пара на получение  $1 \text{ кдж}$  электроэнергии. На производство  $1 \text{ кг}$  пара необходимых параметров затрачивается  $3\,300 \text{ кдж}$ .

Найти к.п.д. паротурбинной установки.

**Ответ:**  $\eta = 27,55\%$ .

### 3. ЗАКОНЫ И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

**3-1.** Начальное состояние азота задано параметрами:  $t = 200^\circ \text{C}$ ,  $v = 1,9 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Азот нагревается в процессе при постоянном давлении, причем объем азота увеличивается втрое.

Определить конечную температуру.

**Ответ:**  $t = 1\,146^\circ \text{C}$ .

**3-2.** В цилиндре с подвижным поршнем находится кислород при температуре  $t = 80^\circ \text{C}$  и разрежении (вакууме), равном  $320 \text{ мм рт. ст.}$ . При постоянной температуре кислород сжимается до избыточного давления  $p_{\text{изб}} = 12 \text{ кг/см}^2$ . Барометрическое давление равно  $745 \text{ мм рт. ст.}$ .

Во сколько раз уменьшится объем кислорода?

**Ответ:**  $V_1/V_2 = 22,5$ .

3-3. Абсолютное давление азота в сосуде при комнатной температуре ( $t=20^\circ\text{C}$ )  $p=22$  бар. В сосуде азот нагревают, причем известно, что предельное избыточное давление, при котором возможна безопасная работа, составляет 60 бар.

Определить температуру, до которой возможно нагревание азота. Барометрическое давление равно 750 мм рт. ст.

Ответ:  $t=539^\circ\text{C}$ .

3-4. Определить плотность воздуха и водорода при нормальных условиях.

Ответ:  $\rho_{\text{возд}} = 1,293 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{\text{H}_2} = 0,0899 \text{ кг/м}^3$ .

3-5. Известно, что 1 кмоль газа содержит  $6,023 \cdot 10^{26}$  молекул. Для того чтобы представить себе, как велико это число, полезно проделать мысленно такой опыт.

Пусть имеется сосуд объемом в 1 см<sup>3</sup>, в котором создан полный вакуум, т. е. из этого сосуда удалены все молекулы. В стенке сосуда сделано отверстие такого размера, что из окружающего воздуха в сосуд проникают молекулы со скоростью 100 тыс. молекул в секунду.

Определить, сколько времени потребуется, чтобы плотность воздуха в рассматриваемом объеме стала равной плотности окружающего воздуха, если окружающий воздух находится при нормальных условиях, а скорость проникновения молекул остается неизменной.

Ответ:  $8,51 \cdot 10^6$  лет.

3-6. Определить величину коэффициента изотермического сжатия  $\lambda = -\frac{1}{p} \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_T$  для азота и водорода, если эти газы находятся при абсолютном давлении  $p=12$  бар и температуре  $t=430^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $\lambda_{\text{N}_2} = \lambda_{\text{H}_2} = 0,0833 \text{ 1/бар}$ .

3-7. Определить численное значение коэффициента теплового расширения  $\alpha = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$  и термического коэффициента давления  $\beta = \frac{1}{p} \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v$  для кислорода и окиси углерода CO, если эти газы находятся при параметрах  $p=1200 \text{ кн/м}^2$  и  $t=430^\circ\text{C}$ .

Ответ:

$$\alpha_{\text{N}_2} = \alpha_{\text{CO}} = \beta_{\text{N}_2} = \beta_{\text{CO}} = \frac{1}{703,15} = 0,001422 \text{ 1/град.}$$

3-8. Паротурбинная установка мощностью 100 000 кВт расходует 0,37 кг топлива на 1 кВт·ч.

Какова должна быть суммарная массовая производительность (кг/ч) вентиляторов, подающих воздух в топку котла, если для сжигания 1 кг топлива требуется 15 м<sup>3</sup> воздуха при нормальных условиях?

Ответ:  $m=717,2 \text{ т/ч}$ .

3-9. Определить массу воздуха, находящегося в комнате площадью 25 м<sup>2</sup> и высотой 3,2 м.

Принять, что температура воздуха в комнате равна  $t=22^{\circ}\text{C}$ , а барометрическое давление равно  $B=986,5$  ммбар.

Ответ:  $m=93,1$  кг.

3-10. Определить плотности азота при абсолютных<sup>1</sup> давлениях  $p=10$  и  $60$  ат. Температура азота равна  $t=400^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $\rho_1=4,91$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2=29,4$  кг/м<sup>3</sup>.

3-11. Вычислить универсальную газовую постоянную в дж/кмоль·град, зная, что в технической системе единиц газовая постоянная равна  $\mu R=847,83$  кг·м/кмоль·град.

Ответ:  $\mu R=8314,4$  дж/кмоль·град.

3-12. Определить удельный объем кислорода при давлении  $23$  бар и температуре  $280^{\circ}\text{C}$ . Задачу решить в международной системе единиц.

#### Решение

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{\frac{8314,4}{32} \text{ дж/кг} \cdot \text{град} \cdot 553,15 \text{ град}}{23 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2} = 0,0625 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Размерность удельного объема м<sup>3</sup>/кг получается, если учесть, что  $1 \text{ дж} = 1 \text{ н} \cdot \text{м}$ .

3-13. Решить предыдущую задачу (3-12) в технической системе единиц.

#### Решение

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{\frac{847,83}{32} \text{ кг} \cdot \text{м/кг} \cdot \text{град} \cdot 553,15 \text{ град}}{23 \text{ бар} \cdot 10197,2 \text{ кг/м}^2/\text{бар}} = 0,0625 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

размерности  $[v] = \text{м}^3/\text{кг}$  см. задачу 2-15.

3-14. Плотность воздуха при нормальных условиях равна  $\rho=1,293$  кг/м<sup>3</sup>\*

Чему равна плотность воздуха при параметрах  $t=20^{\circ}\text{C}$  и  $p=15$  бар?

Ответ:  $\rho=17,82$  кг/м<sup>3</sup>.

3-15. Измерение объемов газов может дать представление о строении молекул газа.

Определить, является ли действительно молекула кислорода двухатомной молекулой, если известно, что в объеме, равном  $4$  л, находится  $5$  г кислорода при температуре  $t=150^{\circ}\text{C}$ , а давление кислорода равно  $1,373$  бар.

<sup>1</sup> В дальнейшем, если имеется ввиду абсолютное давление, будем писать просто «давление».

\* Обозначение м<sup>3</sup> относится к «нормальному кубическому метру». Широко принятое ранее нм<sup>3</sup> не может теперь употребляться, так как в таком виде этот размер можно расшифровать: «ньютон×метр в кубе» или «нанометр в кубе».

Определить, чему было бы равно давление газа, если бы молекула состояла из трех атомов кислорода (озон  $O_3$ )?

Ответ:  $\mu$  32; молекула состоит из двух атомов. Для озона  $p = 0,916$  бар.

3-16. При экспериментальном исследовании удельных объемов паров жидкостей определяют массу пара, находящегося в измерительном сосуде (пъезометре) объемом  $V$ . Для этого пар конденсируют и полученную жидкость выпускают в бюкс и взвешивают. Однако при атмосферном давлении в пъезометре остается некоторое количество вещества, массу которого необходимо учесть. Это с успехом делается с помощью формул для идеального газа.

Определить массу оставшегося в пъезометре вещества, если известно, что объем пъезометра равен  $V = 420$  см<sup>3</sup>, температура равна  $t = 320^\circ\text{C}$ , а давление равно  $p = 1,02$  бар. Исследуемым веществом является этиловый спирт  $C_2H_5OH$ .

Ответ:  $m = 0,40$  г.

3-17. При измерении расхода воздуха с помощью дроссельной шайбы (см. задачу 1-7) было зафиксировано, что при давлении  $p = 750$  мм рт. ст. и температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  расход воздуха равен 24 л/мин.

Определить массовый расход воздуха в кг/мин и объемный — в нормальных кубических метрах в минуту (м<sup>3</sup><sub>н</sub>/мин).

Ответ:  $m = 0,0285$  кг/мин;  $V = 0,0221$  м<sup>3</sup><sub>н</sub>/мин.

3-18. Для экспериментального определения удельного объема реальных газов весьма часто пользуются методом пидростатического взвешивания, измеряя в опыте выталкивающую силу, которая действует на поплавок, помещенный в сжатый газ.

Однако при расчете чувствительности устройства, измеряющего выталкивающую силу, приходится приблизительно оценивать величину выталкивающей силы. В некоторых случаях для такой оценки можно воспользоваться формулами для идеального газа.

Расчитать, пользуясь формулами для идеального газа, какую выталкивающую силу будет испытывать поплавок объемом 8 см<sup>3</sup> в углекислом газе  $CO_2$  при температуре  $t = 700^\circ\text{C}$  и давлении  $p = 600$  кг/см<sup>2</sup>.

Ответ: 2,56 Г.

3-19. 0,3 м<sup>3</sup><sub>н</sub> кислорода находятся в сосуде емкостью 650 см<sup>3</sup>.

Определить показания манометра, измеряющего давление в этом сосуде, если температура кислорода равна  $t = 200^\circ\text{C}$ . Атмосферное давление равно  $B = 762$  мм рт. ст.

Ответ: Избыточное давление  $p_{\text{изп}} = 16,9$  кг/см<sup>2</sup>.

3-20. При температуре  $t = 800^\circ\text{C}$  и давлении  $p = 750$  мм рт. ст. плотность газа равна  $\rho = 0,44764$  кг/м<sup>3</sup>.

Что это за газ?

Ответ: Аргон.

3-21. Компрессор подает кислород в резервуар емкостью 3 м<sup>3</sup>; избыточное давление в резервуаре увеличивается при этом от 0,1 до 6 ат, а температура газа от 15 до 30 $^\circ\text{C}$ .

Определить вес поданного компрессором кислорода. Барометрическое давление  $B = 745$  мм рт. ст.

Ответ:  $\Delta G = 21,8$  кг.

3-22. Вес пустого баллона для аргона емкостью 40 л равен 64 кг.

Сколько будет весить баллон с аргоном, если при температуре  $t=15^\circ\text{C}$  баллон наполняют газом до давления  $p=150\text{ ат}$ ?

Как изменится давление аргона, если баллон внести в помещение, где температура  $t=25^\circ\text{C}$ ?

Ответ: Вес баллона с аргоном равен  $73,8\text{ кг}$ . Давление увеличится до  $155,2\text{ кг/см}^2$ .

3-23. В сосуде объемом  $5\text{ м}^3$  находится воздух при барометрическом давлении  $B=1000\text{ мм рт. ст.}$  и температуре  $300^\circ\text{C}$ . Затем воздух

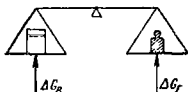


Рис 3-1 К задаче 3-24.

выкачивается до тех пор, пока в сосуде не образуется вакуум, равный  $600\text{ мм рт. ст.}$  Температура воздуха

после выкачивания остается той же. Сколько воздуха (в  $\text{кг}$ ) выкачено? Чему будет равно давление в сосуде после выкачивания, если оставшийся воздух охладить до температуры  $t=20^\circ\text{C}$ ?

Ответ: Выкачено  $2,43\text{ кг}$  воздуха.

После охлаждения воздуха давление оказалось равным  $101\text{ мм рт. ст.}$

3-24. При точном взвешивании на аналитических весах приходится вводить поправку на то, что взвешиваемое тело и гири, находящиеся на различных чашках весов, испытывают со стороны воздуха различную выталкивающую силу.

Каков вес воды в бюксе (рис 3-1), взвешиваемой на аналитических весах, если при равновесии весов на их чашку поставлены гири общим весом  $20,563\text{ Г}$ ? Удельный вес материала гирь равен  $8,4\text{ Г/см}^3$ , а удельный вес воды вместе с бюксой равен  $1,2\text{ Г/см}^3$ . Взвешивание производится в воздухе при температуре  $t=20^\circ\text{C}$  и барометрическом давлении  $B=755\text{ мм рт. ст.}$

### Решение

При равновесии весов имеет место следующее равенство сил:

$$G_{\text{г}} - \Delta G_{\text{г}} = G_{\text{в}} - \Delta G_{\text{в}},$$

где  $G_{\text{г}}$  — вес гирь в пустоте (номинальное значение веса гирь есть их вес в пустоте),

$\Delta G_{\text{г}}$  — выталкивающая сила, действующая на гири;

$G_{\text{в}}$  — вес воды (в пустоте);

$\Delta G_{\text{в}}$  — выталкивающая сила, действующая на воду.

Отсюда истинный вес взвешиваемой воды

$$G_{\text{в}} = G_{\text{г}} + \Delta G_{\text{в}} - \Delta G_{\text{г}}.$$

Согласно закону Архимеда выталкивающая сила равна весу вытесненного воздуха, поэтому

$$\Delta G_{\text{в}} = V_{\text{в}} \frac{1}{v} = \frac{G_{\text{г}}}{\gamma_{\text{в}v}} \quad \text{и} \quad \Delta G_{\text{г}} = V_{\text{г}} \frac{1}{v} = \frac{G_{\text{г}}}{\gamma_{\text{г}v}},$$

где  $V_{\text{в}}$  и  $V_{\text{г}}$  — объемы взвешиваемой воды и гирь соответственно, а  $v$  — удельный объем воздуха.

При расчете поправки на выталкивающую силу воды  $\Delta G_v$  принято, что  $G_v \approx G_r$ , это допустимо, так как выталкивающая сила мала

Подставляя полученные выражения для  $\Delta G_v$  и  $\Delta G_r$  в основную формулу, окончательно получаем.

$$G_v = G_r \left[ 1 + \frac{1}{v} \left( \frac{1}{\gamma_v} - \frac{1}{\gamma_r} \right) \right].$$

Удельный объем воздуха равен.

$$v = \frac{847,83 \cdot 293,15 \cdot 735,559}{28,93 \cdot 765,0 \cdot 10^4} = 0,83615 \text{ м}^3/\text{кг} = 836,15 \text{ см}^3/\text{г}.$$

Вес воды в бюксе равен:

$$G_v = 20,563 \left[ 1 + \frac{1}{836,15} \left( \frac{1}{1,2} - \frac{1}{8,4} \right) \right] = 20,581 \text{ г}.$$

Таким образом, поправка равна приблизительно 0,1%.  
3-25. Решить задачу 3-24, применяя систему СИ

### Решение

Заменяя в основном уравнении равновесия

$$G_v = G_r + \Delta G_v - \Delta G_r$$

весы как произведения масс на ускорения силы тяжести, получаем:

$$m_v g = m_r g + \Delta(m_v g) - \Delta(m_r g)$$

В этом уравнении ускорения  $g$  везде одни и те же (тела, находящиеся и на левой и на правой чашках весов, притягиваются к земле с одним и тем же ускорением), поэтому их можно сократить. Тогда получаем.

$$m_v = m_r + \Delta m_v - \Delta m_r.$$

Выталкивающие силы

$$\Delta(m_v g) = V_v \rho g = \frac{m_v \rho}{\rho_v} g$$

и

$$\Delta(m_r g) = V_r \rho g = \frac{m_r \rho}{\rho_r} g.$$

Здесь  $\rho$  — плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

После сокращения на  $g$  получим:

$$\Delta m_v = m_v \frac{\rho}{\rho_v} \text{ и } \Delta m_r = m_r \frac{\rho}{\rho_r}.$$



Основное уравнение равновесия примет вид:

$$m_n = m_r \left[ 1 + p \left( \frac{1}{\rho_b} - \frac{1}{\rho_r} \right) \right].$$

Плотность воздуха равна (согласно уравнению состояния  $p = \rho RT$ ):

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{755 \text{ мм рт. ст.} \cdot 133,322 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} / \text{мм рт. ст.}}{\frac{8314,4}{23,95} \text{ Дж/кг} \cdot \text{град} \cdot 293,15 \text{ град}} = 1,196 \text{ кг/м}^3.$$

Масса воды в бюксе равна:

$$m_b = 20,563 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \left[ 1 + 1,196 \text{ кг/м}^3 \left( \frac{1}{1200 \text{ кг/м}^3} - \frac{1}{8400 \text{ кг/м}^3} \right) \right] = 20,581 \cdot 10^{-3} \text{ кг} = 20,581 \text{ г}.$$

Решение этой задачи показывает, что при взвешивании на чашечных весах фактически определяется масса исследуемого вещества, так как гири и вещество притягиваются к земле с одинаковым ускорением силы тяжести.

3-26. На аналитических весах взвешивается образец из пластмассы, причем в момент равновесия на весах стоят гири общей массой 80,146 г.

Определить истинную массу образца (т. е. с учетом поправки на выталкивающую силу воздуха), если известно, что плотность пластмассы равна  $\rho_n = 0,2 \text{ г/см}^3$ , а плотность вещества гири  $\rho_r = 8,4 \text{ г/см}^3$ . Взвешивание производится в комнате при параметрах воздуха  $p = 1,02 \text{ бар}$ ,  $t = 25^\circ \text{C}$ .

Ответ:  $m = 80,612 \text{ г}$ ; т. е. поправка составляет приблизительно 0,6%.

#### 4. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ В ИДЕАЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

При решении задач этого раздела там, где это оговорено, следует пользоваться приведенными в приложении таблицами теплоемкостей и энтальпий газов (табл. 8-20).

Для подсчета теплоемкости по квантовой теории в приложении дана таблица функции Эйнштейна (табл. 22) и значения характеристических температур для различных газов (табл. 21).

4-1. Определить при помощи молекулярно-кинетической теории объемные теплоемкости при постоянном объеме  $c_v$  и массовые теплоемкости при постоянном давлении  $c_p$  для азота и сероводорода  $\text{H}_2\text{S}$ , молекула которого нелинейна.

Ответ:

| Газ              | $c'_v$                   |                           | $c_p$       |              |
|------------------|--------------------------|---------------------------|-------------|--------------|
|                  | кдж/м <sup>3</sup> ·град | ккал/м <sup>3</sup> ·град | кдж/кг·град | ккал/кг·град |
| N <sub>2</sub>   | 0,928                    | 0,222                     | 1,039       | 0,248        |
| H <sub>2</sub> S | 1,113                    | 0,266                     | 0,977       | 0,234        |

4-2. Зависимость средней от 0 до  $t^\circ\text{C}$  мольной теплоемкости воздуха от температуры можно приближенно выразить уравнением:

$$\mu c_{pm} \Big|_0^t = 6,949 + 5,76 \cdot 10^{-4} t \text{ ккал/кмоль} \cdot \text{град}.$$

Какое количество тепла необходимо подвести к воздуху, заключенному в сосуде объемом 20 дм<sup>3</sup> при давлении  $p_1 = 10$  бар и температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , чтобы поднять его температуру до  $t_2 = 600^\circ\text{C}$ ?

### Решение

Определим прежде всего количество килограммов воздуха, находящегося в сосуде:

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{10 \cdot 10^5 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 28,96}{8314 \cdot 293,15} = 0,239 \text{ кг}.$$

Известно, что

$$\mu c_{vm} = \mu c_{pm} - \mu R,$$

откуда получаем:

$$\begin{aligned} \mu c_{vm} \Big|_0^t &= 6,949 + 5,76 \cdot 10^{-4} t - \frac{8,314}{4,1868} = \\ &= 4,963 + 5,76 \cdot 10^{-4} t \text{ ккал/кмоль} \cdot \text{град}, \end{aligned}$$

или

$$c_{vm} \Big|_0^t = 0,171 + 0,1988 \cdot 10^{-4} t \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} Q &= m \left[ c_{vm} \Big|_0^{t_2} - c_{vm} \Big|_0^{t_1} \right] = 0,239 (0,183 \cdot 600 - 0,171 \cdot 20) = \\ &= 26,4 \text{ ккал} = 106 \text{ кдж}. \end{aligned}$$

4-3. Подсчитать среднюю массовую и среднюю объемную теплоемкость воздуха при нагревании его от  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 800^\circ\text{C}$  в процессе при постоянном объеме, пользуясь таблицами. Сравнить полученный результат со значениями теплоемкостей, подсчитанными по молекулярно-кинетической теории

Ответ:  $c_{v m} \Big|_{t_1}^{t_2} = 0,188 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}, c'_{v m} \Big|_{t_1}^{t_2} = 0,243 \text{ ккал/м}^3_{\text{н}} \cdot \text{град}.$

По молекулярно-кинетической теории:  $c_v = 0,171 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град};$

$c'_v = 0,221 \text{ ккал/м}^3_{\text{н}} \cdot \text{град}.$  Ошибка  $\delta \approx 9\%.$

4-4. Определить изменение внутренней энергии 0,4 кг азота при расширении его в цилиндре с подвижным поршнем, если в результате процесса температура азота падает от  $500^\circ \text{C}$  до  $150^\circ \text{C}$ .

Решить задачу, пользуясь таблицами.

Определить относительную ошибку, получаемую в случае, если полагать, что теплоемкость является постоянной величиной.

Ответ:  $\Delta U = 109,1 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 26,1 \text{ ккал}.$  Ошибка  $\delta \approx 4\%.$

4-5. Определить величину энтальпии воздуха, отсчитанную от  $0^\circ \text{C}$  при температуре  $t_1 = 287^\circ \text{C}$  и  $t_2 = 560^\circ \text{C}$ , если известна интерполяционная формула для истинной теплоемкости воздуха:

$\mu c_p = 6,90 + 14,8 \cdot 10^{-4} t - 20,1 \cdot 10^{-8} t^2 \text{ ккал/кмоль} \cdot \text{град}.$

### Решение

Известно, что

$$\Delta i = \int_{t_0}^i c_p dt.$$

Вследствие того что  $i_0 = 0$  при  $t_0 = 0^\circ \text{C}$ :

$$i_{287} = \int_0^{287} (6,90 + 14,8 \cdot 10^{-4} t - 20,1 \cdot 10^{-8} t^2) dt =$$

$$= 6,9 \cdot 287 + 7,4 \cdot 10^{-4} \cdot 287^2 - 6,7 \cdot 10^{-8} \cdot 287^3 = 2041 \text{ ккал/кмоль}.$$

Аналогично

$$i_{560} = 6,9 \cdot 560 + 7,4 \cdot 10^{-4} \cdot 560^2 - 6,7 \cdot 10^{-8} \cdot 560^3 = 4084 \text{ ккал/кмоль}.$$

4-6. Определить значение средней мольной теплоемкости в процессе при постоянном давлении для азота в интервале температур от  $300$  до  $400^\circ \text{C}$ , если выражение для величины его истинной теплоемкости имеет вид:

$\mu c_p = 6,86 + 0,00125 t - 3,01 \cdot 10^{-10} t^2 \text{ ккал/кмоль} \cdot \text{град}.$

### Решение

$$\mu c_{p m} \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (6,86 + 0,00125 t - 3,01 \cdot 10^{-10} t^2) dt =$$

$$= 6,86 + 0,00125 \frac{300 + 400}{2} - 3,01 \cdot 10^{-10} \frac{400^2 + 300 \cdot 400 + 300^2}{3} =$$

$$= 7,294 \text{ ккал/кмоль} \cdot \text{град}.$$

4-7. Средняя молярная теплоемкость  $\mu c_{pm}$  для водорода задана уравнением

$$\mu c_{pm} \Big|_0^t = 6,88 + 2,67 \cdot 10^{-4} t \text{ ккал/кмоль} \cdot \text{град.}$$

Получить формулы для средней теплоемкости при постоянном объеме, отнесенной к 1 кг и 1 м<sup>3</sup> газа. Подсчитать среднюю (между 0 и 500°С) объемную теплоемкость водорода при постоянном объеме.

$$\text{Ответ: } c_{vm} \Big|_0^{500} = 2,44 + 1,33 \cdot 10^{-4} t \text{ ккал/кг} \cdot \text{град.}$$

$$c'_{vm} \Big|_0^{500} = 0,218 + 0,119 \cdot 10^{-4} t \text{ ккал/м}^3 \cdot \text{град.}$$

$$c'_{vm} \Big|_0^{500} = 0,224 \text{ ккал/м}^3 \cdot \text{град.}$$

4-8. В компрессоре газовой турбины сжимается воздух. Начальная температура воздуха  $t_1 = 30^\circ\text{C}$ , конечная температура после сжатия  $t_2 = 150^\circ\text{C}$ . Определить изменение энтальпии и внутренней энергии воздуха в процессе сжатия, считая значения теплоемкостей по молекулярно-кинетической теории.

$$\text{Ответ: } \Delta i = 28,92 \text{ ккал/кг} = 120,58 \cdot 10^3 \text{ дж/кг.}$$

$$\Delta u = 20,52 \text{ ккал/кг} = 85,41 \cdot 10^3 \text{ дж/кг.}$$

4-9. В регенеративном подогревателе газовой турбины воздух нагревается от  $t_1 = 130^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 500^\circ\text{C}$ .

Определить количество тепла, сообщенное воздуху в единицу времени, если расход его составляет 250 кг/ч. Ответ дать в ккал/ч, в кдж/сек и в квт. Для решения задачи воспользоваться таблицами.

$$\text{Ответ: } Q = 23 \text{ 196 ккал/ч} = 26,9 \text{ кдж/сек} = 26,9 \text{ квт.}$$

4-10. Зависимость молярной теплоемкости СО от температуры выражается следующими экспериментально найденными данными:

|                                                 |      |      |      |      |       |       |
|-------------------------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|
| $T, ^\circ\text{K}$                             | 300  | 500  | 700  | 900  | 1 500 | 2 000 |
| $\mu c_p, \text{ ккал/кмоль} \cdot \text{град}$ | 6,96 | 7,11 | 7,43 | 7,75 | 8,36  | 8,59  |

Выразить, воспользовавшись методом наименьших квадратов, зависимость  $\mu c_p = f(T)$ , задавшись уравнением вида:

$$\mu c_p = a + bT.$$

Проверить точность полученного уравнения.

## Решение

Сущность метода наименьших квадратов в применении к нашей задаче в кратких чертах заключается в следующем.

Экспериментальные данные не абсолютно точны, а имеют систематические и случайные ошибки. Поэтому необходимо составить такую формулу зависимости между теплоемкостью и температурой, которая давала бы при подсчете минимум погрешностей. В теории вероятности доказывается, что ошибка минимальна тогда, когда сумма квадратов разностей между вычисленными и экспериментальными данными минимальна.

Сумма квадратов разности  $\sum [\mu_{c_p} - (a + bT)]^2$  есть функция постоянных  $a$  и  $b$ . Ее значение минимально в случае равенства нулю ее частных производных. Поэтому

$$\left[ \frac{\partial \varphi(a, b)}{\partial a} \right]_b = \sum^2 [\mu_{c_p} - a - bT] (-1) = 0;$$

$$\left[ \frac{\partial \varphi(a, b)}{\partial b} \right]_a = \sum^2 [\mu_{c_p} - a - bT] (-T) = 0.$$

Решая систему двух уравнений с двумя неизвестными

$$\sum_1^n -\mu_{c_p} + na + b \sum_1^n T = 0;$$

$$\sum_1^n -\mu_{c_p} T + a \sum_1^n T + b \sum_1^n T^2 = 0,$$

где  $n$  — число экспериментальных точек, определим постоянные  $a$  и  $b$ .

Для упрощения расчетов вводим в качестве аргумента вместо  $T$  величину  $T^* = \frac{T - 300}{100}$ .

Необходимые для расчета данные сводим в таблицу:

| $T$      | $\mu_{c_p}$ | $T^*$ | $(T^*)^2$ | $\mu_{c_p} T^*$ |
|----------|-------------|-------|-----------|-----------------|
| 300      | 6,96        | 0     | 0         | 0               |
| 500      | 7,11        | 2     | 4         | 14,22           |
| 700      | 7,43        | 4     | 16        | 29,72           |
| 900      | 7,75        | 6     | 36        | 46,50           |
| 1 500    | 8,36        | 12    | 144       | 100,32          |
| 2 000    | 8,59        | 17    | 289       | 146,03          |
| $\Sigma$ | 46,20       | 41    | 489       | 336,79          |

Составляем уравнения:

$$46,2 = 6a + 41b;$$

$$336,79 = 41a + 489b.$$

Решая систему уравнений, находим, что  $a=7,011$ ;  $b=0,1008$ . Следовательно,

$$\mu c_p = 7,011 + 0,1008 \frac{T - 300}{100}$$

или

$$\mu c_p = 6,709 + 10,08 \cdot 10^{-4} T, \text{ ккал/кмоль} \cdot \text{град.}$$

Сравним опытные значения теплоемкости с подсчитанными по полученному уравнению:

| $T, ^\circ\text{K}$ | 300  | 500  | 700  | 900  | 1 500 | 2 000 |
|---------------------|------|------|------|------|-------|-------|
| $\mu c_p$ (опытн.)  | 6,96 | 7,11 | 7,43 | 7,75 | 8,36  | 8,59  |
| $\mu c_p$ (расч.)   | 7,01 | 7,21 | 7,42 | 7,62 | 8,22  | 8,73  |

Совпадение с экспериментальными данными было бы ближе, если бы мы составили уравнение вида  $\mu c_p = a + bT + cT^2$ . В этом случае составляется и решается система трех уравнений с тремя неизвестными.

4-11. По экспериментальным данным молярная теплоемкость аммиака  $\mu c_p$  при  $300^\circ\text{K}$  равна 6,81, а при  $T=800^\circ\text{K}$  она составляет 9,58 ккал/кмоль · град.

Установить, пользуясь приведенными значениями, интерполяционную формулу температурной зависимости теплоемкости, принимая линейный характер указанной зависимости.

Интерполяционную формулу составить для случаев, когда температура выражена в градусах Кельвина и в градусах Цельсия.

Ответ:

$$\mu c_p = 5,148 + 5,54 \cdot 10^{-4} T \text{ ккал/кмоль} \cdot \text{град.}$$

$$\mu c_p = 6,661 + 5,54 \cdot 10^{-4} t \text{ ккал/кмоль} \cdot \text{град.}$$

4-12. Подсчитать теплоемкость  $c_v$ , ккал/кг · град, для окиси азота NO при  $t=1600^\circ\text{C}$ , учитывая энергию колебаний атомов в молекуле и считая колебания гармоническими. Сравнить полученные результаты с табличными данными.

### Решение

Молярная теплоемкость идеальных газов при не слишком высоких температурах с учетом спектроскопических данных может быть подсчитана по формуле

$$\mu c_v = \frac{3+n}{2} \mu R + \mu R \sum_i^l \left( \frac{h\nu}{kT} \right)^2 \frac{e^{h\nu/kT}}{(e^{h\nu/kT} - 1)^2}.$$

В этой формуле:

$n$  — число вращательных степеней свободы; для двухатомных и линейных многоатомных молекул  $n=2$ ;

$i=3$   $m=(3+n)$  — число колебательных степеней свободы ( $m$  — число атомов в молекуле). Для двухатомных молекул  $i=1$ ;

$\mu R$  — газовая постоянная, отнесенная к одному киломолю;

$h=6,62 \cdot 10^{-34}$  — постоянная Планка, дж · сек;

$\nu$  — частота колебаний, 1/сек;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  постоянная Больцмана, дж/град.

$T$  — абсолютная температура, °К

Величину  $h\nu/k = \Theta$  называют „характеристической температурой“. Значения  $\Theta$  для некоторых газов даны в табл. 21 приложений.

Написанную выше формулу для  $\mu c_v$  можно представить в виде:

$$\mu c_v = \frac{3+n}{2} \mu R + \sum_i C_i,$$

где  $C_i = \mu R f\left(\frac{\Theta}{T}\right)$  находится в табл. 22. приложений.

Из таблицы находим для NO:

$$\Theta = 2705^\circ \text{K}.$$

При  $\frac{\Theta}{T} = \frac{2705}{1873} = 1,444$  величина  $C = 1,6768$  ккал/кмоль·град.

Искомая теплоемкость

$$\begin{aligned} \mu c_v &= \frac{3+2}{2} \cdot 1,986 + 1,677 = 6,642 \text{ ккал/кмоль} \cdot \text{град} = \\ &= 27,8 \text{ кдж/кмоль} \cdot \text{град}; \end{aligned}$$

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{6,642}{30,0} = 0,221 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}.$$

По табличным данным  $c_v = 0,2245$  ккал/кг·град, т. е. ошибка составляет  $\delta = 1,4\%$ . Источник ошибки заключается в том, что предложенная формула не учитывает асгармоничности колебаний, возбуждений электронных уровней энергии и взаимодействия между колебательной, вращательной и электронной энергиями.

4-13. Определить теплоемкость  $\mu c_v$  кислорода при температурах  $t_1 = 500^\circ \text{C}$  и  $t_2 = 1000^\circ \text{C}$ , учитывая колебательную составляющую и считая колебания гармоническими. Сравнить полученные результаты с табличными данными.

Ответ: При  $t_1 = 500^\circ \text{C}$   $\mu c_v = 6,00$  ккал/кмоль·град;

$\mu c_{v, \text{таб}} = 6,027$  ккал/кмоль·град. При  $t_2 = 1000^\circ \text{C}$

$\mu c_v = 6,510$  ккал/кмоль·град;  $\mu c_{v, \text{таб}} = 6,592$  ккал/кмоль·град.

4-14. Подсчитать теплоемкость  $c_p$ , дж/кг·град, окиси углерода CO при  $T = 1000^\circ \text{K}$ , учитывая наличие колебательной составляющей и считая колебания гармоническими. Сравнить результаты с табличными данными.

Ответ:  $c_p = 1,180 \cdot 10^3$  дж/кг·град. Табличное значение  $c_p = 1,184 \cdot 10^3$  дж/кг·град;

$$\delta = 0,34\%.$$

**4-15.** Подсчитать теплоемкость  $c_p$ ,  $\text{кДж/кг} \cdot \text{град}$  для углекислого газа  $\text{CO}_2$  при  $t=800^\circ\text{C}$ , учитывая энергию колебаний атомов в молекуле и считая колебания гармоническими. Сравнить полученные результаты с табличными данными. Определить, какова ошибка в процентах, если рассчитывать теплоемкость по молекулярно-кинетической теории теплоемкости.

**Пояснение.** Каждой степени свободы колебательного движения отвечает своя частота  $\nu$  и своя характеристическая температура  $\Theta$ . Если молекула симметрична, то две или более частоты могут совпадать. Соответствующие им колебания называются вырожденными. В формулу для теплоемкости энергии вырожденных колебаний входят с соответствующими множителями.

Молекула  $\text{CO}_2$  линейна. Из четырех степеней свободы колебательного движения две степени совпадают. Поэтому молекула  $\text{CO}_2$  дважды вырожденная. Из табл. 21 приложений находим для  $\text{CO}_2$ :

$$\Theta_1 = 954 (2); \Theta_2 = 1920; \Theta_4 = 3360 (2)\text{K};$$

$$\mu c_v = \frac{3+2}{2} \mu R + \left[ 2f\left(\frac{\Theta_1}{T}\right) + f\left(\frac{\Theta_2}{T}\right) + f\left(\frac{\Theta_4}{T}\right) \right] \mu R.$$

**Ответ:**  $c_p = 1,250 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$ .

По табличным данным при  $t=800^\circ\text{C}$   $c_p = 1,249 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$   
Расхождение  $\delta = 0,08\%$ .

По молекулярно-кинетической теории  $c_p = 0,67 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$ .  
Расхождение составляет примерно 46%.

**4-16.** Определить теплоемкость сероводорода  $\text{H}_2\text{S}$  при температуре  $t=1000^\circ\text{C}$ , учитывая энергию колебаний атомов в молекуле, считая колебания гармоническими.

$$\Theta_1 = 1810; \Theta_2 = 3750 (2)^\circ\text{K}.$$

Сравнить полученные данные с табличными. Молекула сероводорода имеет нелинейную структуру.

**Ответ:**  $c_p = 0,341 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град} = 1,425 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$ ;

$$c_{p, \text{табл}} = 0,342 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град} = 1,429 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}.$$

## 5. СМЕСИ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

**5-1.** Воздух (приближенно считая, что он является смесью только азота и кислорода) имеет следующий объемный состав:

$$r_{\text{N}_2} = 79,0\%; r_{\text{O}_2} = 21,0\%.$$

Определить весовые доли азота и кислорода в воздухе; вычислить газовую постоянную и кажущийся молекулярный вес воздуха.

**Ответ:**  $R_{\text{см}} = 0,288 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град} = 29,3 \text{ кг} \cdot \text{м/кг} \cdot \text{град}$ ;  $\mu = 28,84$ .

**5-2.**  $0,3 \text{ м}^3$  воздуха смешиваются с  $0,5 \text{ кг}$  углекислого газа. Оба газа до смешения имели параметры

$$p = 6 \text{ кг/см}^2 \text{ и } t = 45^\circ\text{C}.$$

Определить парциальное давление углекислого газа после смешения.

**Ответ:**  $p_{\text{CO}_2} = 85,5 \text{ кН/м}^2$ .



5-3. Дымовые газы имеют следующий массовый состав:

$$g_{\text{CO}_2} = 16,1\%; g_{\text{O}_2} = 7,5\%; g_{\text{N}_2} = 76,4\%.$$

Рассчитать энтальпию  $i'_{\text{см}}$  этих газов, отнесенную к  $1 \text{ м}^3_{\text{н}}$  при температуре  $t = 800^\circ\text{C}$ .

### Решение

Согласно принципу аддитивности энтальпии

$$i_{\text{см}} = \sum_{j=1}^n g_j i_j, \text{ ккал/кг.}$$

По заданным условиям

$$i_{\text{см}} = g_{\text{CO}_2} \cdot i_{\text{CO}_2} + g_{\text{O}_2} \cdot i_{\text{O}_2} + g_{\text{N}_2} \cdot i_{\text{N}_2}, \text{ ккал/кг,}$$

где  $i_j = f(t)$  находим по таблицам приложений:

$$\begin{aligned} i_{\text{см}} &= 0,161 \cdot 207,4 + 0,075 \cdot 194,1 + 0,764 \cdot 209,7 = \\ &= 208,2 \text{ ккал/кг} = 872 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

Для того чтобы найти  $i'_{\text{см}}$ ,  $\text{ккал/м}^3_{\text{н}}$ , необходимо знать плотность смеси при нормальных условиях. Известно, что

$$(\rho_{\text{см}})_0 = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{g_j}{(\rho_j)_0}}.$$

Плотности  $(\rho_j)_0$  составляющих смесь газов (см. приложение, табл. 5):

$$(\rho_{\text{CO}_2})_0 = 1,977; (\rho_{\text{O}_2})_0 = 1,429; (\rho_{\text{N}_2})_0 = 1,251 \text{ кг/м}^3_{\text{н}}.$$

Следовательно,

$$(\rho_{\text{см}})_0 = \frac{1}{\frac{0,161}{1,977} + \frac{0,075}{1,429} + \frac{0,764}{1,251}} = \frac{1}{0,7446} = 1,343 \text{ кг/м}^3_{\text{н}}.$$

Искомая величина энтальпии  $i'_{\text{см}}$ :

$$i'_{\text{см}} = (\rho_{\text{см}})_0 \cdot i_{\text{см}} = 1,343 \text{ кг/м}^3_{\text{н}} \cdot 872 \text{ кДж/кг} = 1171 \text{ кДж/м}^3_{\text{н}}.$$

5-4. Рассчитать истинную теплоемкость  $c_p$ ,  $\text{ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C}$  смеси паров этилового спирта и воды. Массовая доля этилового спирта равна  $g_{\text{сп}} = 0,9383$ .

Расчет произвести, пользуясь таблицами [Л. 6] для температур 200 и  $400^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $c_{p,200} = 0,5026 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C}$ ;

$$c_{p,400} = 0,6104 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C}.$$

5-5. Определить удельный объем и массовую теплоемкость  $c_p$  пара натрия при  $p=1 \text{ Мн/м}^2$  и температуре  $t=927^\circ \text{С}$ , если известно, что при этих параметрах пар натрия является смесью одноатомных и двухатомных молекул следующего мольного состава:

$$r_{\text{Na}} = 0,8628 \text{ и } r_{\text{Na}_2} = 0,1372.$$

Найти парциальные давления одно- и двухатомных паров натрия.

Вычислить, как велика была бы ошибка в значении удельного объема, если бы пар натрия считался одноатомным газом.

Теплоемкости газов, составляющих смесь, рассчитать согласно молекулярно-кинетической теории.

Атомный вес натрия принять равным  $\mu_{\text{Na}} = 23,0$ .

### Решение

Парциальное давление  $j$ -й составляющей смеси равно:

$$p_j = r_j p_{\text{см}}$$

Поэтому

$$p_{\text{Na}} = 0,8628 \cdot 1 = 0,8628 \text{ Мн/м}^2$$

и

$$p_{\text{Na}_2} = 0,1372 \cdot 1 = 0,1372 \text{ Мн/м}^2.$$

Кажущийся молекулярный вес смеси

$$\mu_{\text{см}} = \sum_{j=1}^n r_j \mu_j = 0,8628 \cdot 23,0 + 0,1372 \cdot 46,0 = 26,2$$

Удельный объем смеси находим из уравнения состояния:

$$v_{\text{см}} = \frac{R_{\text{см}} T}{p_{\text{см}}} = \frac{8314 \cdot 1200}{26,2 \cdot 10^5} = 0,381 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Если бы смесь состояла только из одноатомных молекул, то

$$v_{\text{Na}} = v_{\text{см}} \frac{\mu_{\text{см}}}{\mu_{\text{Na}}} = 0,433 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Искомая ошибка

$$\delta = \frac{v_{\text{Na}} - v_{\text{см}}}{v_{\text{см}}} \cdot 100 = \frac{0,433 - 0,381}{0,381} \cdot 100 = 13,7\%.$$

Теплоемкость смеси определяется как

$$c_{p,\text{см}} = \frac{1}{\mu_{\text{см}}} \sum_{j=1}^n r_j (\mu c_p)_j.$$

Мольные теплоемкости  $\text{Na}$  и  $\text{Na}_2$  равны соответственно:

$$(\mu c_p)_{\text{Na}} = \frac{\mu R}{2} 5 \text{ дж/кмоль} \cdot \text{град} \text{ и } (\mu c_p)_{\text{Na}_2} = \frac{\mu R}{2} 7 \text{ дж/кмоль} \cdot \text{град}.$$

Следовательно,

$$c_{p, \text{см}} = \frac{1}{26,2} \cdot \frac{8314}{2} (0,8628 \cdot 5 + 0,1372 \cdot 7) = 832 \text{ дж/кг} \cdot \text{град}.$$

5-6. В настоящее время проектируются энергетические установки, работающие по так называемому парогазовому циклу, в котором рабочим веществом является смесь водяного пара и горячих продуктов сгорания. Массовая доля продуктов сгорания топлива (принять, что продукты сгорания обладают свойствами воздуха)  $g=0,7$ .

Определить теплоемкость  $c_p$ , ккал/кг·град, смеси при температуре 500 и 800°С, а также удельный объем смеси при  $t=500^\circ\text{C}$  и давлении  $p=10 \text{ кг/см}^2$ .

Ответ:  $c_{p, 500} = 0,335 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}.$

$$c_{p, 800} = 0,361 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}.$$

$$v_{\text{см}} = 0,272 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

5-7. В сосуде находится смесь газов, образовавшаяся в результате смешения 10 кг азота, 13 кг аргона и 27 кг двуокиси углерода. Определить мольный состав смеси, ее удельный объем при нормальных условиях, кажущийся молекулярный вес смеси и газовую постоянную, отнесенную к одному нормальному кубическому метру.

Ответ:  $(r_\mu)_{\text{N}_2} = 0,275$ ;  $(r_\mu)_{\text{Ar}} = 0,251$ ;  $(r_\mu)_{\text{CO}_2} = 0,474$

$$(v_{\text{см}})_0 = 0,579 \text{ м}^3/\text{кг}; \mu_{\text{см}} = 38,61;$$

$$R'_{\text{см}} = 372 \text{ дж/кг} \cdot \text{град}.$$

5-8. Влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха и водяного пара. Известно, что на каждый килограмм сухого воздуха во влажном воздухе содержится  $d \text{ г/кг с. в.}$  водяного пара.

Определить весовые и объемные доли сухого воздуха и водяного пара, плотность при нормальных условиях, газовую постоянную, отнесенную к 1 кг, и кажущийся молекулярный вес смеси, если  $d=10 \text{ г/кг с. в.}$

Ответ:  $g_{\text{с.в.}} = 0,9901$ ;  $g_{\text{в.п.}} = 0,0099$ ;

$$r_{\text{с.в.}} = 0,9842$$
;  $r_{\text{в.п.}} = 0,0158$ ;

$$\mu_{\text{см}} = 28,786$$
;  $R_{\text{см}} = 289 \text{ дж/кг} \cdot \text{град}$ ;

$$\rho_{\text{см}} = 1,285 \text{ кг/м}^3.$$

5-9. Объемный состав горючего газа следующий:

$$r_{\text{CO}} = 10\%, r_{\text{H}_2} = 45\%, r_{\text{C}_2\text{H}_4} = 35\%, r_{\text{C}_2\text{H}_6} = 4\%,$$

$$r_{\text{CO}_2} = 3\%, r_{\text{N}_2} = 3\%.$$

Определить кажущийся молекулярный вес, плотность, удельный объем при нормальных условиях, массовую газовую постоянную  $R$ , парциальное давление метана в процентах и весовые содержания компонентов.

Ответ:  $\mu_{\text{см}} = 12,63$ ,  $\rho_{\text{см}} = 0,563 \text{ кг/м}^3$ ;

$\nu_{\text{см}} = 1,776 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $R_{\text{см}} = 0,658 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град} = 67,1 \text{ кГ} \cdot \text{м/кг} \cdot \text{град}$ ;

$g_{\text{CO}} = 0,222$ ;  $g_{\text{H}_2} = 0,072$ ;  $g_{\text{C}_2\text{H}_4} = 0,089$ ;  $g_{\text{CH}_4} = 0,445$ ;  $g_{\text{N}_2} = 0,067$ ;

$g_{\text{CO}_2} = 0,105$ ;  $p_{\text{CH}_4} = 35,0\%$ .

5-10. Смесь газов, получающаяся при сжигании 1 кг мазута в топке парового котла, имеет следующий состав, определенный парциальными объемами составляющих:

$$V_{\text{CO}_2} = 1,85 \text{ м}^3; V_{\text{O}_2} = 0,77 \text{ м}^3; V_{\text{N}_2} = 12,78 \text{ м}^3.$$

Определить весовые доли и парциальные давления составляющих, если общее давление  $p = 1,018 \text{ кГ/см}^2$

Ответ:  $g_{\text{CO}_2} = 0,175$ ;  $g_{\text{N}_2} = 0,773$ ;  $g_{\text{O}_2} = 0,052$ ;

$p_{\text{CO}_2} = 0,051$ ;  $p_{\text{N}_2} = 0,845$ ;  $p_{\text{O}_2} = 0,122 \text{ кГ/см}^2$ .

5-11. Сосуд разделен перегородкой на две части, объемы которых равны  $V_1 = 1,5 \text{ м}^3$  и  $V_2 = 1,0 \text{ м}^3$ . В части  $V_1$  содержится двуокись углерода  $\text{CO}_2$  при давлении  $p_1 = 5 \text{ кГ/см}^2$  и температуре  $t_1 = 30,0^\circ \text{C}$ , а в части  $V_2$  кислород  $\text{O}_2$  при  $p_2 = 2 \text{ кГ/см}^2$  и  $t_2 = 57,0^\circ \text{C}$ .

Определить массовые и объемные доли  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ , кажущийся молекулярный вес смеси и ее газовую постоянную, после того как перегородка будет убрана и процесс смешения закончится.

### Решение

Массы газов рассчитываются по уравнению состояния  $pV = mRT$ .

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{p_1 V_1}{R_1 T_1} = \frac{5 \cdot 98066,5 \cdot 1,5 \cdot 44}{8314 \cdot 303,15} = 12,84 \text{ кг};$$

$$m_{\text{O}_2} = \frac{p_2 V_2}{R_2 T_2} = \frac{2 \cdot 98066,5 \cdot 1,0 \cdot 32}{8314 \cdot 330,15} = 2,28 \text{ кг}.$$

Массовые доли:

$$g_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{\sum_{j=1}^n m_j} = \frac{12,84}{12,84 + 2,28} = 0,849;$$

$$g_{\text{O}_2} = \frac{2,28}{12,84 + 2,28} = 0,151.$$

Объемные доли:

$$r_{\text{CO}_2} = \frac{g_{\text{CO}_2}/\mu_{\text{CO}_2}}{\sum_{i=1}^n g_i/\mu_i} = \frac{0,849/44}{0,849/44 + 0,151/32} = 0,803;$$

$$r_{\text{O}_2} = \frac{0,151/32}{0,849/44 + 0,151/32} = 0,197.$$

Кажущийся молекулярный вес и газовая постоянная смеси:

$$\mu_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n g_i/\mu_i} = \frac{1}{0,02402} = 41,7; R_{\text{см}} = \frac{\mu R}{\mu_{\text{см}}} = \frac{8314}{41,7} =$$

$$= 199,3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}.$$

5-12. Образование смеси двух газов — азота и гелия — происходит так же, как оно описано в задаче 5-11.

Состояние газов до смешения характеризуется таблицей:

| Величин                    | N <sub>2</sub> | He  |
|----------------------------|----------------|-----|
| Масса, <i>m</i> , кг . . . | 10             | 5   |
| Давление <i>p</i> , бар    | 8              | 20  |
| Температура <i>t</i> , °C  | 120            | 860 |

Найти параметры смеси ( $p_{\text{см}}$  и  $t_{\text{см}}$ ), а также парциальные давления N<sub>2</sub> и He после окончания процесса смешения.

Теплообмен со средой отсутствует.

### Решение

Ввиду того что внутренняя энергия системы в процессе смешения не меняется (объем системы постоянен и теплообмена со средой нет), можно записать уравнение баланса внутренней энергии

$$U_{\text{см}} = U_{\text{N}_2} + U_{\text{He}},$$

в правой части которого стоят значения внутренней энергии N<sub>2</sub> и He до смешения. Разделив это уравнение на величину массы смеси  $m_{\text{см}}$ , получим:

$$u_{\text{см}} = g_{\text{N}_2} \cdot u_{\text{N}_2} + g_{\text{He}} u_{\text{He}}, \text{ ккал/кг},$$

где  $g_{\text{N}_2}$  и  $g_{\text{He}}$  — массовые доли азота и гелия, равные:

$$g_{\text{N}_2} = \frac{10}{10+5} = 0,667; g_{\text{He}} = 1 - 0,667 = 0,333.$$

Внутренние энергии соответственно равны:

$$u_{\text{см}} = (c_{vm} \int_0^t t)_{\text{см}}; u_{\text{N}_2} = (c_{vm} \int_0^t t)_{\text{N}_2}; u_{\text{He}} = (c_{vm} \int_0^t t)_{\text{He}}.$$

Находя среднюю теплоемкость азота в табл. 8 приложений, а теплоемкость гелия вычисляя по молекулярно-кинетической теории (так как теплоемкость одноатомного газа практически не зависит от температуры), получим:

$$u_{\text{см}} = (c_{vm} \int_0^t)_{\text{см}} = g_{\text{N}_2} (c_{vm} \int_0^t)_{\text{N}_2} + g_{\text{He}} (c_v \cdot t)_{\text{He}}, \quad \text{ккал/кг};$$

$$u_{\text{см}} = 0,667 \cdot 0,17777 \cdot 120 + 0,333 \cdot \frac{1,986}{2} \cdot \frac{3}{4,002} \cdot 860 = 227,4 \text{ ккал/кг}.$$

Для нахождения температуры смеси составим предварительно таблицу зависимости  $u_{\text{см}}$  от температуры, учитывая, что внутренняя энергия смеси равна:

$$u_{\text{см}} = \sum_{j=1}^n g_j u_j, \quad \text{где } [u_j] = \text{ккал/кг}.$$

| $t \text{ } ^\circ\text{C}$ | $u_{\text{N}_2} = (c_{vm} \int_0^t)_{\text{N}_2}$ | $u_{\text{He}} = \frac{1,986}{2} \times \frac{3}{4,002} t$ | $g_{\text{N}_2} u_{\text{N}_2}$ | $g_{\text{He}} u_{\text{He}}$ | $u_{\text{см}} = \sum_1^n g_j u_j$ |
|-----------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 500                         | $0,1837 \cdot 500 = 91,9$                         | 372,2                                                      | 61,3                            | 123,9                         | 185,2                              |
| 600                         | $0,1861 \cdot 600 = 111,7$                        | 446,6                                                      | 74,5                            | 148,7                         | 223,2                              |
| 700                         | $0,1887 \cdot 700 = 132,1$                        | 521,1                                                      | 88,1                            | 173,5                         | 261,6                              |

Теперь (зная, что  $u_{\text{см}} = 227,4 \text{ ккал/кг}$ ), интерполируя, находим температуру  $t_{\text{см}} = 611^\circ\text{C}$ .

Кажущийся молекулярный вес и газовую постоянную находим подобно тому, как это было сделано в задаче 6-11:

$$\mu_{\text{см}} = 9,343; \quad R_{\text{см}} = 889,9 \text{ дж/кг} \cdot \text{град}.$$

Объем смеси равен сумме объемов  $\text{N}_2$  и  $\text{He}$  до смешения, т. е.

$$V_{\text{см}} = V_{\text{N}_2} + V_{\text{He}} = \left( \frac{mRT}{P} \right)_{\text{N}_2} + \left( \frac{mRT}{P} \right)_{\text{He}} =$$

$$= \frac{10 \cdot 8314 \cdot 393}{28,8 \cdot 10^5} + \frac{5 \cdot 8314 \cdot 1133}{4,002 \cdot 20 \cdot 10^5} = 1,458 + 5,883 = 7,341 \text{ м}^3.$$

Давление смеси

$$p_{\text{см}} = \frac{mRT}{V} = \frac{15 \cdot 889,9 \cdot 884}{7,341} = 16,07 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2 = 16,07 \text{ бар}.$$

Парциальные давления азота и гелия:

$$p_{\text{N}_2}^{\text{парц}} = p_{\text{см}} g_{\text{N}_2} \cdot \frac{\mu_{\text{см}}}{\mu_{\text{N}_2}} = 16,07 \cdot 0,667 \cdot \frac{9,343}{28,016} = 3,57 \text{ бар};$$

$$p_{\text{He}}^{\text{парц}} = p_{\text{см}} g_{\text{He}} \cdot \frac{\mu_{\text{см}}}{\mu_{\text{He}}} = 16,07 \cdot 0,333 \cdot \frac{9,343}{4,003} = 12,50 \text{ бар}.$$

5-13. Имеется два сосуда, соединенных между собой трубкой, на которой установлен кран, фазобитающий их. В первом сосуде, емкость которого  $V_1=2 \text{ м}^3$ , находится воздух при  $p_1=10 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1=27^\circ\text{C}$ . Второго ( $V_2=1 \text{ м}^3$ ) содержит также воздух при  $p_2=2 \text{ кг/см}^2$  и  $t_2=57^\circ\text{C}$ . Кран при этом закрыт. Затем кран открывается и система приходит в равновесное состояние.

Определить давление и температуру образовавшейся смеси. Температуру считать не зависящей от температуры.

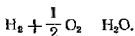
Ответ:  $p_{\text{см}}=7,4 \text{ кг/см}^2$ ,  $t_{\text{см}}=29,7^\circ\text{C}$ .

5-14. Горючая смесь состоит из водорода и этана ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) и задана объемными долями  $r_{\text{H}_2}=0,40$  и  $r_{\text{C}_2\text{H}_6}=0,60$ .

Подсчитать количество воздуха, теоретически необходимое для сжигания  $1 \text{ м}^3_{\text{н}}$  смеси.

### Решение

Уравнения реакции полного сгорания водорода и этана таковы:



Из этих уравнений следует, что для сжигания  $1 \text{ кмоль}$  водорода требуется  $\frac{1}{2} \text{ кмоль}$  кислорода и для  $1 \text{ кмоль}$  этана —  $3,5 \text{ кмоль}$  кислорода.

Учитывая то, что объемы киломоля любых газов в идеальном состоянии приблизительно равны между собой ( $\mu v_0=22,4 \text{ м}^3_{\text{н}}/\text{кмоль}$ ) и что в воздухе содержится 21,0% кислорода по объему, нетрудно подсчитать теоретически необходимое для сжигания  $1 \text{ м}^3_{\text{н}}$  объемное количество воздуха:

$$v_0 = \frac{100}{21} (0,5r_{\text{H}_2} + 3,5r_{\text{C}_2\text{H}_6}) \frac{\text{м}^3_{\text{н}}}{\text{м}^3_{\text{н}}} \text{ смеси}.$$

Подставляя значения  $r$ , получаем:

$$v_0 = \frac{100}{21} (0,5 \cdot 0,40 + 3,5 \cdot 0,60) = 10,95 \frac{\text{м}^3_{\text{н}}}{\text{м}^3_{\text{н}}} \text{ смеси}.$$

5-15. Горючий газ, полученный при подземной газификации подмосковного угля, имеет следующий объемный состав:  $\text{N}_2=63,6\%$ ;  $\text{H}_2=14,5\%$ ;  $\text{CO}=10,0\%$ ;  $\text{CO}_2=9,5\%$ ;  $\text{H}_2\text{S}=0,6\%$  и  $\text{CH}_4=1,8\%$ .

Рассчитать объем воздуха, теоретически необходимый для сгорания  $1 \text{ м}^3_{\text{н}}$  газа.

Ответ:  $v_0 = 0,798 \frac{\text{м}^3_{\text{н}}}{\text{м}^3_{\text{н}}} \text{ газа}$

5-16. Используя условия и результаты предыдущей задачи (5-15), рассчитать объем  $v \frac{\text{м}^3_{\text{н}}}{\text{м}^3_{\text{н}}} \text{ газа}$  продуктов полного сгорания, получающихся при сгорании  $1 \text{ м}^3_{\text{н}}$  подземного газа, если полное сгорание его осуществляется при теоретически необходимом объеме воздуха. В воздухе на каждый килограмм «сухого» (не содержащего водяных паров) воздуха содержится 10 г водяных паров.

## Решение

Полный объем продуктов сгорания на 1  $M_H^3$  горючего газа складывается из парциальных объемов  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $N_2$  и объема водяных паров ( $H_2O$ ) или, иначе, из объема «сухих» газов  $v_{c.r}$  и объема водяных паров  $v_{H_2O}$ :

$$v = v_{c.r} + v_{H_2O}, \text{ где } v_{c.r} = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{N_2} \cdot M_H^3 / M_H^3 \text{ газа.}$$

*Расчет объема  $CO_2$ .*

$CO_2$  получается в результате сгорания  $CO$  и  $CH_4$ ; кроме того, углекислота содержится в самом горючем газе.

Рассматривая уравнения химических реакций горения, можно заключить, что на каждый киломоль сжигаемых окиси углерода  $CO$  и метана  $CH_4$  получается 1 кмоль  $CO_2$ . Следовательно,

$$v_{CO_2} = r_{CO_2} + r_{CO} + r_{CH_4} \cdot M_H^3 / M_H^3 \text{ газа.}$$

*Расчет объема  $SO_2$ .*

На 2 кмоль сжигаемого  $H_2S$  получается 2 кмоль  $SO_2$ . Значит,  $v_{SO_2} = r_{H_2S} \cdot M_H^3 / M_H^3$  газа.

*Расчет объема азота  $N_2$ .*

Объем азота складывается из объема азота, содержащегося в самом горючем газе  $v_{N_2} = r_{N_2} \cdot M_H^3 / M_H^3$  газа, и объема азота, внесенного с воздухом.

Полный объем азота

$$v_{N_2} = v_{N_2r} + v_{N_2\text{возд}} = r_{N_2} + 0,79v_0 \cdot M_H^3 / M_H^3 \text{ газа,}$$

где  $v_0 = 0,798 \frac{M_H^3 \text{ возд.}}{M_H^3 \text{ газа}}$  — теоретически необходимый объем воздуха (см. предыдущую задачу).

Таким образом, объем сухих газов

$$\begin{aligned} v_{c.r} &= v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{N_2} = r_{CO_2} + r_{CO} + r_{CH_4} + r_{H_2S} + r_{N_2} + \\ &+ 0,79v_0 = 0,095 + 0,100 + 0,018 + 0,006 + 0,636 + 0,79 \cdot 0,798 = \\ &= 1,485 M_H^3 / M_H^3 \text{ газа} \end{aligned}$$

Объем водяных паров складывается из объема водяных паров, получающихся при сгорании водорода, сероводорода и метана, а также из объема водяных паров, внесенных с воздухом. Рассматривая уравнения химических реакций, видим, что на 1 кмоль сжигаемого  $H_2$  получается 1 кмоль  $H_2O$ , на 2 кмоль  $H_2S$  — 2 кмоль  $H_2O$  и на 1 кмоль  $CH_4$  — 2 кмоль  $H_2O$ . Значит, объем водяных паров  $v_{H_2O}^r$ , получающийся при сжигании 1  $M_H^3$  горючего газа, равен:

$$v_{H_2O}^r = r_{H_2} + r_{H_2S} + 2r_{CH_4}$$



Объем водяных паров  $v_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{возд}}$ , внесенных с воздухом, равен:

$$v_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{возд}} = \frac{v_0 p_0^{\text{возд}} d}{1000 p_0^{\text{H}_2\text{O}}}, \quad M_{\text{H}}^3 / M_{\text{H}}^3 \text{ газа,}$$

где  $v_0 = 0,798 \text{ м}_\text{H}^3 / \text{м}_\text{H}^3 \text{ газа}$  — теоретически необходимый объем воздуха;

$$p_0^{\text{возд}} = \frac{p^{\text{возд}}}{22,4} = \frac{29}{22,4} = 1,293 \text{ кг/м}_\text{H}^3 \text{ — плотность сухого воздуха,}$$

$d = 10 \text{ г/кг с.в.}$  — количество водяного пара в граммах на каждый килограмм сухого воздуха, подводимого для сгорания;

$$p_0^{\text{H}_2\text{O}} = \frac{p^{\text{H}_2\text{O}}}{22,4} = \frac{18,016}{22,4} = 0,805 \text{ кг/м}_\text{H}^3 \text{ — плотность водяного пара.}$$

Таким образом, полный объем водяных паров

$$\begin{aligned} v_{\text{H}_2\text{O}} &= v_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{r}} + v_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{возд}} = r_{\text{H}_2} + r_{\text{H}_2\text{S}} + 2r_{\text{CH}_4} + v_0 \frac{p_0^{\text{возд}} d}{1000 p_0^{\text{H}_2\text{O}}} = \\ &= 0,145 + 0,006 + 2 \cdot 0,018 + 0,798 \frac{1,293 \cdot 10}{1000 \cdot 0,805} = 0,200 \text{ м}_\text{H}^3 / \text{м}_\text{H}^3 \text{ газа.} \end{aligned}$$

Наконец, искомый полный объем газов

$$v = v_{\text{с.г.}} + v_{\text{H}_2\text{O}} = 1,485 + 0,200 = 1,685 \text{ м}_\text{H}^3 / \text{м}_\text{H}^3 \text{ газа.}$$

**5-17.** Рассчитать объем продуктов полного сгорания этано-водородной смеси, состав которой задан в задаче 5-14. Объем воздуха, теоретически необходимый для сгорания  $1 \text{ м}_\text{H}^3$  смеси, взять из той же задачи. Влагосодержание воздуха  $d = 10 \text{ г/кг с.в.}$

Ответ:  $v = 12,226 \text{ м}_\text{H}^3 / \text{м}_\text{H}^3 \text{ смеси.}$

## 6. ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

**6-1.** В закрытом сосуде, имеющем объем  $V = 0,8 \text{ м}^3$ , находится углекислый газ при давлении  $p_1 = 22 \text{ кг/см}^2$  и температуре  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ . Газу сообщается  $Q_v = 100 \text{ ккал}$  тепла.

Определить температуру и давление углекислого газа в конце процесса. Задачу решить двумя способами: 1) считая теплоемкость постоянной и принимая ее по молекулярно-кинетической теории; 2) считая теплоемкость зависящей от температуры и пользуясь табл. 18 приложений.

### Решение

1) Количество тепла, выраженное через постоянную теплоемкость и разность температур, равно:

$$Q_v = mc_v (t_2 - t_1).$$

Отсюда

$$t_2 = \frac{Q_v}{mc_v} + t_1, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Масса газа  $m = \frac{p_1 V_1}{RT_1}$ , кг, где  $R = \frac{\mu R}{\mu}$ .

Теплоемкость при постоянном объеме, отнесенная к 1 кг, согласно молекулярно-кинетической теории равна:

$$c_v = \frac{\mu R}{2} (\nu_{\text{пост}} + \nu_{\text{вр}}) \frac{1}{\mu},$$

где  $\nu_{\text{пост}} = 3$  и  $\nu_{\text{вр}} = 2$  — число степеней свободы поступательного и вращательного движения молекулы  $\text{CO}_2$  (эта молекула линейная).

Подставляя значения  $Q_v$ ,  $m$ ,  $c_v$  и  $t_1$  в формулу для  $t_2$ , получаем:

$$t_2 = \frac{1\,100 \cdot 4\,187 \cdot 8\,314 \cdot 293 \cdot 44 \cdot 2}{22 \cdot 0,981 \cdot 10^5 \cdot 0,8 \cdot 44 \cdot 8\,314 \cdot 5} + 20^\circ\text{C} = 313 + 20 = 333^\circ\text{C}.$$

Здесь 4 187 дж/ккал — переводный коэффициент килокалорий в джоули;

8 314 дж/кмоль·град —  $\mu R$  — киломолярная газовая постоянная;

$0,981 \cdot 10^5 \frac{\text{н/м}^2}{\text{кг/см}^2}$  — переводный коэффициент для давления;

44 кг/кмоль =  $\mu$  — масса 1 кмоль  $\text{CO}_2$ .

Давление в конечном состоянии

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 22 \cdot 0,981 \cdot 10^5 \cdot \frac{606}{293} = 44,6 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2 = 45,5 \text{ кг/см}^2.$$

2. Согласно первому закону термодинамики

$$Q_v = U_2 - U_1$$

откуда

$$u_2 = \frac{Q_v}{m} + u_1.$$

Пользуясь табл. 18 приложений, составляем таблицу значений внутренних энергий в зависимости от температуры:

| $t, ^\circ\text{C}$ | $c_{vm} \Big _0^t$<br>ккал/кг·град | $u = c_{vm} \Big _0^t t$<br>ккал/кг |
|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 0                   | 0,1495                             | 0                                   |
| 100                 | 0,1617                             | 16,17                               |
| 200                 | 0,1723                             | 34,46                               |
| 300                 | 0,1815                             | 54,45                               |

Линейно интерполируя, нахожу значение  $u_1$  (при  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ):

$$u_1 = 3,23 \text{ ккал/кг} = 3,23 \cdot 4\,187 \text{ дж/кг}.$$

Рассчитываем  $u_2$ :

$$u_2 = \frac{Q_v}{m} + u_1 = \frac{Q_v RT_1}{p_1 V_1 \mu} + u_1 = \frac{1 \cdot 100 \cdot 4 \cdot 187 \cdot 8 \cdot 314 \cdot 293}{22 \cdot 0,981 \cdot 10^5 \cdot 0,8 \cdot 44} +$$

$$+ 3,23 \cdot 4 \cdot 187 = 161 \cdot 100 \text{ Дж/кг} = 38,48 \text{ ккал/кг.}$$

По известной теперь величине  $u_2$  из подсчитанной нами таблицы (снова интерполируя линейно в интервале 200–300°С) находим:

$$t_2 = 220^\circ \text{С.}$$

Подсчитываем конечное давление:

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 22 \cdot 0,981 \cdot 10^5 \frac{493}{293} = 36,3 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2 = 37,0 \text{ кг/см}^2.$$

**6-2.** В газгольдере объемом  $V=15 \text{ м}^3$  находится метан  $\text{CH}_4$  при давлении  $p_1=8 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и температуре  $t_1=10^\circ \text{С}$ . Благодаря солнечной радиации температура газа в течение дня повысилась на  $\Delta t=15^\circ \text{С}$ .

Как возросло давление газа в газгольдере и какое количество тепла воспринял газ? Теплоемкость метана считать не зависящей от температуры. Молекула метана нелинейная.

**Ответ:**  $p_2=8,4 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2 = 8,6 \text{ кг/см}^2$ ;  $Q_v=1908 \text{ кДж} = 456 \text{ ккал}$ .

**6-3.** В цилиндре карбюраторного двигателя внутреннего сгорания после сжатия горючей смеси оказывается давление  $p_1=15 \text{ кг/см}^2$  и температура  $t_1=365^\circ \text{С}$ . В этот момент смесь поджигается при помощи электрической свечи, после чего происходит весьма быстрый процесс горения, протекающий практически при постоянном объеме.

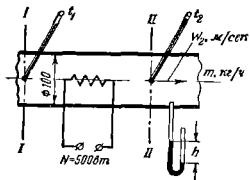


Рис 6-1. К задаче 6-4.

Определить давление и температуру в конце процесса, условно заменяя процесс горения смеси обратимым изохорическим процессом, в котором к рабочему телу подводится тепло  $q_v=110 \text{ ккал/кг}$ .

Рабочее тело при этом считать обладающим свойствами воздуха. Теплоемкость  $c_v$  считать зависящей от температуры.

**Ответ:**  $p_2=27,4 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2 = 28,0 \text{ кг/см}^2$ ;  $t_2=917^\circ \text{С}$ .

**6-4.** Для измерения расхода азота в трубопровод диаметром 100 мм поставлен электрический нагреватель мощностью 500 Вт (рис. 6-1). Омывая нагреватель, азот повышает свою температуру за  $t_2-t_1=3^\circ \text{С}$ .

Каков часовой расход азота  $m \text{ кг/ч}$ , если U-образный манометр, установленный на трубопроводе, показывает разрежение  $h=200 \text{ мм рт. ст.}$ , а барометр — давление 750 мм рт. ст.? Какова скорость азота в сечении за нагревателем, если термометр за нагревателем показывает  $t_2=65^\circ \text{С}$ ?

Давление на участке I—II считать неизменным.

Ответ:  $m=578 \text{ кг/ч}$ ;  $w_2=28,0 \text{ м/сек}$ .

6-5. Воздух в количестве  $5 \text{ м}^3/\text{мин}$  при температуре  $t=20^\circ \text{C}$  и давлении  $p=1 \text{ кг/см}^2$  поступает в компрессор, где сжимается, затем протекает по трубкам холодильника, охлаждаемым водой.

Определить часовой расход охлаждающей воды, если на выходе из компрессора воздух имеет параметры:  $p_1=8 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1=180^\circ \text{C}$ . Температура воздуха за холодильником  $t_2=35^\circ \text{C}$ . Вода нагревается на  $\Delta t=18^\circ \text{C}$ . Потерями тепла пренебречь.

Ответ:  $m_w=681 \text{ кг/ч}$ .

6-6. Через воздухоподогреватель котельного агрегата протекает воздух в количестве  $V_0=11\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . На входе его температура равна  $t_1=45^\circ \text{C}$ .

Какова температура  $t_2$  воздуха на выходе из воздухоподогревателя, если топочные газы сообщают ему количество тепла, равное  $Q_p=670 \text{ Мкал/ч}$ ?

Определить величину работы расширения воздуха, которую он совершает в течение 1 ч.

Процесс подогрева воздуха считать изобарическим  $p_{\text{воз}}=1 \text{ кг/см}^2$

Ответ:  $t_2=239^\circ \text{C}$ ;  $L_p=794 \text{ Мдж/ч}$

6-7. Дымовые газы, входящие в воздухоподогреватель котельного агрегата, имеют объемный состав:  $\text{CO}_2=10,8\%$ ;  $\text{O}_2=6,6\%$ ;  $\text{N}_{2\text{взм}}=80,7\%$ ;  $\text{H}_2\text{O}=1,9\%$ . Нагревая воздух, газы охлаждаются от  $t_{1г}=350^\circ \text{C}$  до  $t_{2г}=160^\circ \text{C}$ .

Определить температуру нагретого воздуха, если известно, что часовой расход дымовых газов  $V_0=53\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; часовой расход воздуха  $m_w=51\,000 \text{ кг/ч}$ ; температура воздуха на входе в воздухоподогреватель  $t_{1в}=45^\circ \text{C}$

Воздухоподогреватель теряет в окружающую среду  $4\%$  от тепла, отнимаемого у газов.

### Решение

Процессы нагревания воздуха и охлаждения газов можно считать изобарическими. Поэтому тепло, отданное газами и воспринятое воздухом, следует полагать равным убыванию (или приращению) энтальпий:  $Q_{\text{г}}=I_{1г}-I_{2г}$ ;  $Q_{\text{в}}=I_{2в}-I_{1в}$ . Баланс тепла в процессе теплообмена следует записать:

$$0,96(I_{1г}-I_{2г})=I_{2в}-I_{1в}, \text{ ккал/ч.}$$

Так как состав дымовых газов задан в объемных долях, удобно пользоваться таблицами [Л 6], в которых имеются данные по энтальпиям, отнесенным к  $1 \text{ м}^3_{\text{в}}$ .

Уравнение баланса можно переписать:

$$0,96V_0(i'_{1г}-i'_{2г})=m_w(i'_{2в}-i'_{1в}) \text{ ккал/ч.}$$

Здесь  $i'_{1г}$  и  $i'_{2г}$  ккал/м<sup>3</sup><sub>г</sub> — удельные энтальпии дымовых газов, отнесенные к  $1 \text{ м}^3_{\text{г}}$ ,  $i'_{1в}$  и  $i'_{2в}$ , ккал/кг — удельные энтальпии воздуха, отнесенные к  $1 \text{ кг}$ .

По принципу аддитивности энтальпий имеем для смеси газов:

$$i'_{\text{г}} = \sum_1^n i'_{j\text{г}} = i'_{\text{CO}_2} r_{\text{CO}_2} + i'_{\text{O}_2} r_{\text{O}_2} + i'_{\text{N}_{2,\text{атм}}} r_{\text{N}_{2,\text{атм}}} + \\ + i'_{\text{H}_2\text{O}} r_{\text{H}_2\text{O}}, \text{ ккал/м}^3_{\text{г}}$$

Составляем расчетную таблицу:

| $t, ^\circ\text{C}$ | $i'_{\text{CO}_2}$ | $i'_{\text{O}_2}$ | $i'_{\text{N}_2, \text{атм}}$ | $i'_{\text{H}_2\text{O}}$ | $(i')_{\text{CO}_2}$ | $(i')_{\text{O}_2}$ | $(i')_{\text{N}_2, \text{атм}}$ | $(i')_{\text{H}_2\text{O}}$ | $i'_r = \sum_1^n r_j i'_j$             |
|---------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|
| 160                 | 67,48              | 50,86             | 49,63                         | 58,01                     | 7,29                 | 3,36                | 40,05                           | 1,10                        | 51,8 ккал/кг <sup>3</sup> <sub>H</sub> |
| 350                 | 159,0              | 114,4             | 109,7                         | 130,1                     | 17,17                | 7,55                | 88,53                           | 2,47                        | 115,7                                  |

Находим энтальпию воздуха  $i_{2в}$ , ккал/кг, определив по таблицам  $i_{1в} = 10,81$  ккал/кг (при температуре  $t_{1в} = 45^\circ\text{C}$ ):

$$i_{2в} = \frac{0,96V_0 (i'_{1г} - i'_{2г}) + m_{в} i_{1в}}{m_{в}} =$$

$$= \frac{0,96 \cdot 53\,000 (115,7 - 51,8) + 51\,000 \cdot 10,81}{51\,000} = 74,6 \text{ ккал/кг.}$$

По величине  $i_{2в}$  в таблицах, интерполируя, находим:

$$t_{2в} = 306^\circ\text{C}.$$

6-8. Средний состав дымовых газов, омывающих поверхности нагрева котельного агрегата, задан объемными долями:

$$r_{\text{CO}_2} = 0,11; r_{\text{O}_2} = 0,07; r_{\text{N}_2, \text{атм}} = 0,82$$

Определить, сколько тепла отдает каждый килограмм газов при прохождении по газоходу, если на входе в него они имеют температуру  $t_1 = 100^\circ\text{C}$ , а на выходе  $t_2 = 180^\circ\text{C}$ . Считать, что абсолютное давление газов в процессе теплообмена не меняется.

Ответ:  $q_p = -1\,044$  кДж/кг

6-9. В цилиндре, площадь поперечного сечения которого равна  $1 \text{ дм}^2$ , под поршнем находится  $1/2$  кмоль азота  $\text{N}_2$  при температуре  $t_1 = 63^\circ\text{C}$ . Поршень находится под постоянной внешней нагрузкой  $F = 2 \text{ кН}$ . Газу извне сообщается тепло  $Q = 1\,500$  ккал, вследствие чего он расширяется, отодвигая поршень.

Определить параметры  $p$ ,  $v$ ,  $t$  в конце процесса, изменение внутренней энергии  $\Delta U$ , изменение энтальпии  $\Delta I$  и величину работы расширения  $L$ , совершенной газом.

Ответ:  $p_2 = p_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ,  $v_2 = 0,499 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $t_2 = 483^\circ\text{C}$ ;  $\Delta U = -4\,534$  кДж,  $\Delta I = 6\,280$  кДж,  $L = 1\,746$  кДж.

6-10. Воздух в количестве  $0,1 \text{ м}^3/\text{сек}$  при температуре  $t = 30^\circ\text{C}$  и давлении  $p = 1 \text{ бар}$  поступает в компрессор, где сжимается, а за тем протекает между труб холодильника, в которых движется охлаждающая вода.

Определить часовой расход воды, если на выходе из компрессора воздух имеет параметры  $p_1 = 8 \text{ бар}$  и  $t_1 = 200^\circ\text{C}$ . Температура воздуха за холодильником  $t_2 = 40^\circ\text{C}$ . Вода нагревается на  $\Delta t = 20^\circ\text{C}$ . Потери тепла пренебречь.

Ответ:  $m_{в} = 800 \text{ кг/ч}$

6-11.  $0,5 \text{ м}^3$  окиси углерода находится в состоянии при  $p_1 = 25 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1 = 350^\circ \text{C}$ . В изотермическом процессе к газу подведено тепло  $Q = 20 \text{ ккал}$ .

Найти параметры  $p, v$  начального и конечного состояний, работу расширения, совершенную газом, изменение внутренней энергии и энтальпии.

Ответ:  $v_1 = 0,0754 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $v_2 = 0,1556 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $p_2 = 12,1 \text{ кг/см}^2 = 11,9 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ;  $L = 83,74 \text{ кДж}$ ,  $\Delta U = 0$ ,  $\Delta J = 0$

6-12. Во сколько раз изменится абсолютное значение работы изотермического сжатия  $1 \text{ кг}$  идеального газа, имеющего температуру  $T^\circ \text{K}$  и давление  $p_1 = 1 \text{ бар}$ , если конечное давление  $p_2$  в первом процессе равно  $10 \text{ бар}$ , а в других увеличивается в  $10, 100$  и  $1000$  раз?

Как изменится величина работы, если абсолютная температура газа увеличится в  $10$  раз?

Ответ: 1) Абсолютное значение работы вырастет соответственно в  $2, 3$  и  $4$  раза

2) При увеличении  $T$  в  $10$  раз во столько же раз увеличится значение работы

6-13.  $3,5 \text{ м}^3$  азота, находящегося в первоначальном состоянии при  $p_1 = 1,1 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t = 25^\circ \text{C}$ , сжимаются изотермически до давления  $p_2 = 24,2 \text{ бар}$ . Найти удельные объемы в начальном и конечном состояниях, работу, затраченную на сжатие и тепло, отведенное от газа

Ответ:  $v_1 = 0,804 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $v_2 = 0,0365 \text{ м}^3/\text{кг}$ .  $L = Q = -1198 \text{ кДж}$ .

6-14. Применив первый закон термодинамики, показать, что кривая, изображающая адиабату идеального газа в  $p$ - $v$  координатах, проходит всегда круче, чем кривая изотермического процесса.

### Решение

Для адиабатического процесса  $dl = -du$ . Поэтому при расширении идеального газа температура его всегда падает, а при сжатии — растет, так как  $u = f(t)$

Рассматривая два процесса — адиабатический и изотермический, в которых расширение происходит до одного и того же объема (рис. 6-2), можно заключить, что адиабатический процесс не может заканчиваться точкой  $2''$ , лежащей выше точки  $2$  на изотерме, потому что  $t_2' > t_2$ . Равным образом точки конца адиабатического и изотермического расширения не могут совпадать. Следовательно, конечная точка адиабаты  $2'$  должна лежать ниже конечной точки изотермы

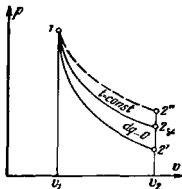


Рис. 6-2. К задаче 6-14

Аналогичное доказательство можно провести, используя любое изохорное сечение применительно не только к процессам расширения, но и к процессам сжатия

6-15. Во сколько раз изменится абсолютное значение работы адиабатического сжатия  $1 \text{ кг}$  идеального газа, для которого  $k = 1,4$ , имеющего начальную температуру  $T_1^\circ \text{K}$  и давление  $p_1 = 1 \text{ бар}$ , если

конечное давление  $p_2$  в первом процессе равно 10 бар, а в других увеличивается в 10, 100 и 1 000 раз?

Как изменится величина работы, если начальная абсолютная температура газа увеличится в 10 раз?

Ответ: 1) Соответственно в 2,93, 6,67 и 13,87 раза

2) При увеличении  $T_1$  во столько же раз возрастет значение работы.

6-16. При адиабатическом расширении 1 кг воздуха ( $k=1,4$  -  $=\text{const}$ ) температура его падает на  $120^\circ\text{C}$

Какова полученная в процессе расширения работа и сколько тепла следовало бы подвести к воздуху, чтобы ту же по величине работу получить в изотермическом процессе?

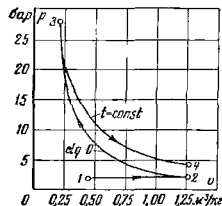


Рис 6-3 К задаче 6-19

Ответ:  $l_{a1}-q_{из}=86,1 \text{ кДж/кг}$

6-17. Какова начальная температура  $t_1$  азота, если его конечная температура после совершения процесса адиабатического сжатия  $t_2=750^\circ\text{C}$ ? Известна степень сжатия  $\epsilon=v_1/v_2=10$ . Теплоемкости  $c_p$  и  $c_v$  постоянны

Ответ:  $t_1=134^\circ\text{C}$

6-18. В баллоне объемом 40 л находится сжатый кислород при  $p_1=140 \text{ кг/см}^2$  и при температуре среды. После быстрого открытия выпускного вентиля кислород вытекает в атмосферу, затем вентиль снова закрывается. Теплообмен между

содержимым баллона и средой за время выпуска практически не успевает совершиться. Давление в баллоне после выпуска оказывается равным  $p_2=70 \text{ кг/см}^2$ . Через некоторое время температура кислорода снова становится равной температуре среды  $t_1=20^\circ\text{C}$

Какова температура кислорода в баллоне сразу после выпуска? Какое количество кислорода вытекло из баллона? Чему равно давление после восстановления первоначальной температуры?

Какое количество кислорода вытекло бы, если бы выпуск происходил весьма медленно, температура газа при этом не менялась бы, а конечное давление  $p_2=70 \text{ кг/см}^2$ ?

Ответ: После выпуска  $t_2=23^\circ\text{C}$ ; вытеснено  $\Delta G_{ад}=2,99 \text{ кг}$ ;  $p_2=82,1 \text{ кг/см}^2$ ; при «изотермическом» выпуске  $\Delta G_{из}=3,61 \text{ кг}$

6-19. Воздух, взятый в количестве 1 кг при параметрах  $p_1=2 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1=37^\circ\text{C}$ , последовательно меняет свое состояние следующим образом (рис. 6-3): сначала он изобарически расширяется до объема  $V_2=2,85 \cdot V_1$ , затем адиабатически сжимается до давления  $p_3=28 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и, наконец, изотермически расширяется до  $V_4=V_2$

Определить «недостающие» параметры во всех характерных точках, подсчитать подведенное или отведенное тепло, изменение внутренней энергии и энтальпии, а также работу деформации в каждом процессе. Проверить уравнение первого закона термодинамики для совокупности процессов

Теплоемкости  $c_p$  и  $c_v$  принять не зависящими от температуры и рассчитать согласно молекулярно-кинетической теории.

Ответ:

| Номера точек | $p$ , бар | $v$ , м <sup>3</sup> /кг | $t$ , °С | $T$ , °К |
|--------------|-----------|--------------------------|----------|----------|
| 1            | 2         | 0,444                    | 37       | 310      |
| 2            | 2         | 1,265                    | 610      | 883      |
| 3            | 28        | 0,1921                   | 1 602    | 1 875    |
| 4            | 4,23      | 1,265                    | 1 602    | 1 875    |

| Номера процессов | $q$   | $\Delta u$ | $\Delta h$ | $l$   |
|------------------|-------|------------|------------|-------|
| к Дж/кг          |       |            |            |       |
| 1—2              | 575   | 164        | 575        | 411   |
| 2—3              | 0     | 711        | 996        | -711  |
| 3—4              | 1 011 | 0          | 0          | 1 011 |
| $\Sigma$         | 1 586 | 875        | 1 571      | 711   |

6-20. В двигателе Дизеля топливо, впрыскиваемое в цилиндр, самовоспламеняется при соприкосновении со сжатым воздухом, имеющим температуру, большую, чем температура воспламенения топлива.

Определить минимально необходимую степень сжатия  $\epsilon = V_1/V_2$  и давление в конце сжатия  $p_2$ , если температура воспламенения топлива равна 630°С. Перед началом сжатия воздух в цилиндре имеет параметры  $p_1 = 0,97$  кг/см<sup>2</sup>,  $t_1 = 60^\circ\text{С}$ . Сжатие считать адиабатическим. Задачу решить, не учитывая зависимости теплоемкости от температуры и принимая  $k = 1,4$ .

Ответ:  $\epsilon = 12,1$ ,  $p_2 = 31,8$  кг/см<sup>2</sup>

6-21. Решить предыдущую (6-20) задачу, учитывая зависимость показателя адиабаты от температуры и применяя таблицы ВТИ [Л. 3]

### Решение

По температурам  $t_1 = 60^\circ\text{С}$  и  $t_2 = 630^\circ\text{С}$  в таблицах находим:

$$\theta_{01} = 4873, \theta_{02} = 346,4, \pi_{01} = 2,0011, \pi_{02} = 76,323.$$

В виду того что

$$\epsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{\theta_{01}}{\theta_{02}} \quad \text{и} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{\pi_{01}}{\pi_{02}},$$

$$\epsilon = \frac{4873}{346,4} = 14,07, \quad p_2 = p_1 \frac{\pi_{02}}{\pi_{01}} = 0,97 \frac{76,323}{2,0011} = 37,0 \text{ кг/см}^2.$$

Сравнивая эти результаты с результатами предыдущей задачи, мы заключаем, что пренебрежение зависимостью  $k = f(t)$  может приводить к значительным ошибкам



6-22. В соплах и на лопатках газовой турбины адиабатически расширяются  $m=1500 \text{ кг/ч}$  двуокиси углерода  $\text{CO}_2$ . Параметры газа на входе в турбину:  $p_1=7 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ;  $t_1=700^\circ\text{C}$ . На выходе  $p_2=0,98 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

Определить параметры  $\text{CO}_2$  на выходе, полезную внешнюю работу газа  $L' = -m \int_{p_1}^{p_2} v \, dp$  (см. рис. 6-4) и теоретическую (т. е. без потерь) мощность турбины  $N_0$ . Расчет сделать с учетом зависимости теплоемкостей от  $t$ , применяя таблицы.

Ответ:  $v_2 = 1,371 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $t_2 = 437^\circ\text{C}$ ;

$$L' = 466 \text{ Мдж/ч}; N_0 = 129 \text{ кВт}.$$

6-23. В компрессор газотурбинной установки входит воздух, имея параметры  $p_1=1 \text{ бар}$  и  $t_1=20^\circ\text{C}$ . Воздух сжимается адиабатически до давления  $p_2=30 \text{ бар}$ . Определить температуру в конце адиабатического сжатия.

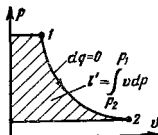


Рис. 6-4. К задаче 6-21.

Задачу решить с помощью таблиц ВТИ [Л. 3]

Ответ:  $t_2=482^\circ\text{C}$ .

6-24. 2 кмоль  $\text{O}_2$  при параметрах  $p_1=40 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1=620^\circ\text{C}$  адиабатически расширяются до давления  $p_2=12 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

Определить параметры  $p$ ,  $v$ ,  $t$  в начале и в конце процесса, работу расширения, изменение внутренней энергии и энтальпии газа. Теплоемкость зависит от температуры.

Задачу решить методом последовательного приближения по табл. 9 приложений и проверить решение по таблицам ВТИ [Л. 3].

### Решение

Удельный объем в начальной точке

$$v \rightarrow \frac{RT_1}{p_1} = \frac{8314 \cdot 893}{32 \cdot 40 \cdot 10^5} = 0,0580 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Считаем, что адиабатический процесс подчиняется уравнению

$$pv^{k_{cp}} = \text{const},$$

где  $k_{cp}$  есть некоторый средний показатель, равный средней арифметической величине из значений показателей адиабаты  $k = c_p/c_v$ , взятых по начальной и конечной температурам процесса:

$$k_{cp} = \frac{k_1 + k_2}{2}.$$

$k_1 = c_{p1}/c_{v1}$ ; истинные теплоемкости  $c_{p1}$  и  $c_{v1}$  находим по табл. 9 приложений, линейно интерполируя в стокградусном интервале температур.

При  $t_1 = 620^\circ \text{C}$ ;  $c_{p1} = 0,2561 \text{ ккал/кг}$ ;  $c_{v1} = 0,1940 \text{ ккал/кг}$ ;

$$k_1 = \frac{0,2561}{0,1940} = 1,320.$$

В первом приближении, учитывая, что  $k$  возрастает с падением температуры, принимаем  $k_2^I = 1,360$ .

$$\text{Тогда } k_{\text{ср}}^I = \frac{k_1 + k_2^I}{2} = \frac{1,320 + 1,360}{2} = 1,340.$$

Определяем  $T_2^I$  в первом приближении:

$$T_2^I = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k_{\text{ср}}^I - 1}{k_{\text{ср}}^I}} = 893 \left( \frac{12}{40} \right)^{\frac{0,340}{1,340}} = 658^\circ \text{K}; \quad t_2^I = 385^\circ \text{C}.$$

По найденной  $t_2^I$  в таблицах находим  $c_{p2}^{\text{II}}$ ,  $c_{v2}^{\text{II}}$  и подсчитываем  $k_2^{\text{II}}$  и  $k_{\text{ср}}^{\text{II}}$  во втором приближении:

$$k_2^{\text{II}} = \frac{c_{p2}^{\text{II}}}{c_{v2}^{\text{II}}} = \frac{0,2435}{0,1814} = 1,342;$$

$$k_{\text{ср}}^{\text{II}} = \frac{k_1 + k_2^{\text{II}}}{2} = \frac{1,320 + 1,342}{2} = 1,331.$$

Температура во втором приближении

$$T_2^{\text{II}} = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k_{\text{ср}}^{\text{II}} - 1}{k_{\text{ср}}^{\text{II}}}} = 662^\circ \text{K}; \quad t_2^{\text{II}} = 389^\circ \text{C}.$$

Таким же способом находим  $T_2^{\text{III}}$  в третьем приближении, определяя:

$$k_2^{\text{III}} = \frac{c_{p2}^{\text{III}}}{c_{v2}^{\text{III}}} = \frac{0,2437}{0,1816} = 1,342; \quad k_{\text{ср}}^{\text{III}} = \frac{1,320 + 1,342}{2} = 1,331.$$

Удовлетворившись точностью расчета температуры  $+1 \text{ град}$ , заканчиваем расчет и принимаем окончательно, что  $t_2 = 389^\circ \text{C}$ , так как  $k_{\text{ср}}^{\text{III}} = k_{\text{ср}}^{\text{II}}$ .

Подсчитываем удельный объем в конечной точке:

$$v_2 = v_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k_{\text{ср}}^{\text{III}}}} = 0,0580 \left( \frac{40}{12} \right)^{\frac{1}{1,331}} = 0,1433 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Проверяем уравнение состояния:

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{8314 \cdot 662}{32 \cdot 12 \cdot 10^5} = 0,1433 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Удельная величина работы расширения

$$l = \frac{R}{k_{\text{ср}} - 1} (T_1 - T_2) = \frac{8314 (893 - 662)}{32 \cdot (1,331 - 1)} = 181,32 \text{ кДж/кг}.$$

Изменение внутренней энергии 1 кг  $O_2$ :

$$u_2 - u_1 = c_{vm} \int_0^{t_2} dt - c_{vm} \int_0^{t_1} dt = 0,1680 \cdot 389 - \\ - 0,1756 \cdot 620 = -43,5 \text{ ккал/кг}.$$

Изменение энтальпии

$$i_2 - i_1 = 89,6 - 147,4 = -57,8 \text{ ккал/кг}.$$

Проверяем уравнение первого закона термодинамики  $l = -\Delta u$ :

$$i = \frac{181,32}{4,1868} = 43,3 \text{ ккал/кг}.$$

Невязка составляет менее 0,5%, что допустимо.

Проверяем решение по таблицам ВТИ [Л 3]. При температуре  $t_1$  находим  $\pi_{01} = 326,53$ . Тогда  $\pi_{02} = \pi_{01} \frac{p_2}{p_1} = 326,53 \cdot \frac{12}{40} = 97,959$ .

По величине  $\pi_{02}$  находим  $t_2 = 339,2^\circ \text{C}$ .

Изменение внутренней энергии

$$u_2 - u_1 = 107,60 - 151,05 = -43,45 \text{ ккал/кг}.$$

Изменение энтальпии

$$i_2 - i_1 = 148,68 - 206,48 = -57,80 \text{ ккал/кг}.$$

Работа  $i = -(u_2 - u_1) = 43,45 \cdot 4,1868 = 181,92 \text{ кДж/кг}$ .

Расхождение между двумя значениями работ (по методике последовательного приближения и по методике ВТИ) составляет всего 0,3%.

Искомые величины для полного количества газа:

$$L = -\Delta U = 64 \cdot 181,92 = 11\,643 \text{ кДж}.$$

$$\Delta I = -64 \cdot 57,80 \cdot 4,1868 = -15\,488 \text{ кДж}.$$

6-25. В двигателе Дизеля воздух при давлении  $p_1 = 1,02 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  и температуре  $t_1 = 40^\circ \text{C}$  сжимается адиабатически. Степень сжатия  $\varepsilon = 18$ .

Определить конечное давление и конечную температуру. Задачу решить с помощью табл. 11 приложений, применяя метод последовательных приближений.

Ответ:  $t_2 = 644^\circ \text{C}$ ;  $p_2 = 53,8 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

6-26. В поршневом компрессоре сжимается воздух, имеющий давление  $p_1 = 1 \text{ кг/см}^2$  и температуру  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ . Процесс сжатия политропический с показателем политропы  $n = 1,3$ . Давление в конце сжатия  $p_2 = 7 \text{ кг/см}^2$ .

Определить работу сжатия для 1 кг воздуха и количество отнятого тепла.

Ответ:  $l = -169 \text{ кдж/кг}$ ;  $q = -9,5 \text{ ккал/кг}$ .

6-27. Поршневой компрессор производительностью  $V_0 = 2 \cdot 100 \text{ м}^3/\text{ч}$  засасывает воздух, имеющий параметры  $p_1 = 0,98 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1 = 25^\circ \text{C}$ , и сжимает его до давления  $p_2 = 9,90 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Процесс сжатия — политропический с показателем  $n = 1,20$ .

Определить, какое количество воды в час нужно пропустить через охлаждающую рубашку цилиндра, если вода нагревается на  $\Delta t = 15 \text{ град}$ .

Ответ:  $m_w = 4,3 \cdot 10^5 \text{ кг/ч}$ .

6-28. 1 кг азота  $\text{N}_2$  в начальном состоянии имеет параметры  $p_1 = 25 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1 = 700^\circ \text{C}$ . После политропического расширения (показатель политропы  $n = 1,180$ ) давление его становится равным  $p_2 = 1 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

Определить изменение внутренней энергии  $\Delta u_{1-2}$ , количество тепла, сообщенное газу в процессе  $q_{1-2}$  и работу расширения  $l_{1-2}$ .

Постоянные теплоемкости  $c_v$  и  $c_p$  условно считать равными средним теплоемкостям  $c_{vm}|_{t_1}^{t_2}$  и  $c_{pm}|_{t_1}^{t_2}$ .

Каким получилось бы значение  $q_{1-2}$ , если бы  $c_v$  и  $c_p$  считать по молекулярно-кинетической теории без учета их зависимости от температуры?

#### Решение

Прежде всего находим конечную температуру  $t_2$ :

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 973 \left( \frac{1}{25} \right)^{\frac{0,180}{1,180}} = 596^\circ \text{K, или } t_2 = 323^\circ \text{C}.$$

Подсчитываем величину работы:

$$l_{1-2} = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{8,314}{0,18 \cdot 28} (700 - 323) = 622 \text{ кдж/кг}.$$

Изменение внутренней энергии

$$\begin{aligned} \Delta u_{1-2} &= c_v (t_2 - t_1) = c_{vm}|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = c_{vm}|_0^{t_2} t_2 - c_{vm}|_0^{t_1} t_1 = \\ &= 0,1800 \cdot 323 + 0,1887 \cdot 700 = -74,0 \text{ ккал/кг}. \end{aligned}$$

Здесь средние теплоемкости  $c_{vm}|_0^{t_2}$  взяты из табл. 8 приложений. Тепло процесса

$$q_{1-2} = c_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) - c_{vm}|_{t_1}^{t_2} \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) = \Delta u_{1-2} \frac{n-k}{n-1}.$$

Так как  $k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_p \Delta t}{c_v \Delta t}$ , а по условию  $c_p = c_{pm}|_{t_1}^{t_2}$  и  $c_v = c_{vm}|_{t_1}^{t_2}$ , то  $k = \frac{\Delta i_{1-2}}{\Delta u_{1-2}}$ .

Величину  $\Delta i_{1-2}$  находим из таблицы:

$$\Delta i_{1-2} = i_2 - i_1 = 80,9 - 181,7 = -100,8 \text{ ккал/кг.}$$

Следовательно,

$$k = \frac{\Delta i_{1-2}}{\Delta u_{1-2}} = \frac{100,8}{74,0} = 1,362,$$

а тепло процесса

$$q_{1-2} = -74,0 \cdot \frac{1,180 - 1,362}{1,180 - 1} = 74,8 \text{ ккал/кг.}$$

Проверяем, выполняется ли первый закон термодинамики для нашего процесса:

$$q_{1-2} = \Delta u_{1-2} + l_{1-2} = -74,0 + \frac{622}{4,1868} = 74,6 \text{ ккал/кг.}$$

Невязка в расчете, равная  $74,8 - 74,6 = 0,2 \text{ ккал/кг}$ , или  $\sim 0,3\%$ , допустима.

Если бы мы вели расчет, не учитывая влияние температуры на теплоемкости  $c_v$  и  $c_p$ , то тепло  $q_{1-2}$  должны были подсчитать, принимая

$$k = 1,40, \text{ а } c_v = \frac{1,986}{2} \cdot \frac{5}{28} \text{ ккал/кг} \cdot \text{град.}$$

Тогда мы получили бы:

$$q'_{1-2} = c_v \frac{n-k}{n-1} = \frac{1,986}{2} \cdot \frac{5}{28} \cdot \frac{1,18 - 1,40}{1,18 - 1} (323 - 700) = 81,7 \text{ ккал/кг.}$$

Расхождение  $q'_{1-2} - q_{1-2} = 81,7 - 74,6 = 7,1 \text{ ккал/кг}$ , равное примерно  $10\%$ , слишком велико. Следовательно, пренебрегать зависимостью теплоемкостей от температуры при расчете  $q$  (а так же и  $\Delta u$ ) в политропическом процессе не следует, если температуры процесса достаточно велики.

6-29. При политропическом расширении газа его объем увеличивается на  $20\%$ , а абсолютная температура уменьшается на  $12\%$ .

Показать примерный ход процесса для двухатомного газа в координатах  $p$  и  $v$  и подсчитать величину работы  $\mu$ , если  $t_1 = 227^\circ \text{C}$ .

Ответ:  $n = 1,701$ ;  $\mu = 712 \text{ кдж/кмоль}$  (рис. 6-5).

6-30. В политропическом процессе расширения окиси углерода энергия, выделяемая газом в форме работы, составляет за счет подводимого тепла ( $25\%$ ) и за счет уменьшения внутренней энергии газа ( $75\%$ ).

Определить показатель политропы и теплоемкость процесса. Представить ход процесса в  $p$ - $v$ -диаграмме.

Ответ:  $n = 1,30$ ;  $c = -0,0591 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град} = 0,247 \text{ кдж/кг} \cdot \text{град}$  (рис. 6-6).

6-31. При сжатии воздуха подведено 12 ккал/кг тепла. В конце процесса температура воздуха увеличилась на 100°С.

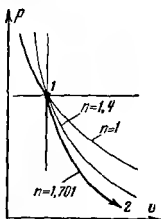


Рис 6-5. К задаче 6-29.

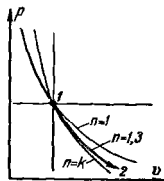


Рис. 6-6. К задаче 6-30.

Определить показатель политропы сжатия. Подсчитать процентное соотношение между работой, теплом и изменением внутренней энергии. Изобразить в  $p$ -диаграмме примерный ход процесса.

Ответ:  $n=2,316$ ;  $q$  — составляет 69,8% от величины  $\Delta u$ ;  $l$  составляет 30,2% от величины  $\Delta u$  (рис. 6-7).

6-32. Некоторый процесс расширения кислорода характеризуется тремя равновесными состояниями, в которых параметры имеют следующие значения: 1)  $p_1=20 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>,  $t_1=487^\circ\text{C}$ ; 2)  $p_2=10 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>,  $v_2=0,427$  м<sup>3</sup>/кг; 3)  $v_3=0,300$  м<sup>3</sup>/кг,  $t_3=576^\circ\text{C}$ .

Определить, является ли этот процесс политропическим. Если да, то чему равен показатель политропы?

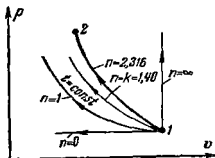


Рис. 6-7. К задаче 6-31.

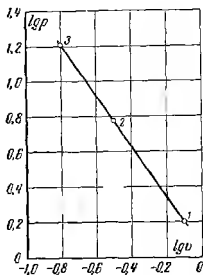


Рис. 6-8. К задаче 6-33.

Ответ: Процесс политропический,  $n=0,90$ .

6-33. На рис. 6-8 показан некоторый политропический процесс 1-2-3 в координатах  $\lg p - \lg v$ .

Определить показатель политропы этого процесса.

Ответ:  $n=1,443$ .

## 7. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

7-1. Определить изменение энтропии 3 кг азота в политропическом процессе при изменении температуры от  $t_1=100^\circ\text{C}$  до  $t_2=300^\circ\text{C}$ . Показатель политропы равен  $n=1,2$ . Теплоемкости принять по молекулярно-кинетической теории. Изобразить процесс в  $pV$ - и  $TS$ -диаграммах.

Ответ:  $\Delta S = 0,956 \text{ кдж/}^\circ\text{K}$ .

7-2. Средняя теплоемкость  $c_p$  алюминия в интервале от 0 до  $300^\circ\text{C}$  равна  $0,228 \text{ ккал/кг}\cdot\text{град}$ .

Определить энтропию 100 кг алюминия при  $300^\circ\text{C}$ , считая, что энтропия при  $0^\circ\text{C}$  равна нулю.

Ответ:  $S = 16,90 \text{ ккал/}^\circ\text{K}$ .

7-3. 50 кг льда, имеющего начальную температуру  $-5^\circ\text{C}$ , помещены в воздух с температурой  $+15^\circ\text{C}$ . Считая, что образующаяся при таянии вода нагреется до температуры воздуха, определить увеличение энтропии, происходящее в результате этого процесса. Теплота таяния льда равна  $\lambda=79,4 \text{ ккал/кг}$ , теплоемкость льда  $c_p=0,485 \text{ ккал/кг}\cdot\text{град}$ . Теплоемкость воды принять равной  $1 \text{ ккал/кг}\cdot\text{град}$ .

Ответ:  $17,65 \text{ ккал/}^\circ\text{K}$ .

7-4. Построить в  $TS$  координатах изобары воздуха в пределах от 0 до  $1500^\circ\text{C}$ , соответствующие 0,1; 1 и  $10 \text{ кг/см}^2$ , приняв значение энтропии воздуха равным нулю при  $t=0^\circ\text{C}$  и  $p=1 \text{ кг/см}^2$ . Построение произвести по точкам, отстоящим на  $300^\circ\text{C}$  друг от друга. Теплоемкость считать линейной функцией температуры.

7-5. 1 кг азота и 1 кг водорода сжимаются изотермически при  $t=15^\circ\text{C}$  от  $1 \cdot 10^5$  до  $10 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

Для какого газа изменение энтропии будет больше и во сколько раз (по отношению к измерению энтропии другого газа).

Ответ:

$$\frac{\Delta S_{\text{H}_2}}{\Delta S_{\text{N}_2}} = 13,9.$$

7-6. Определить изменение энтропии в процессе испарения 1 кг воды при давлении, равном 1 ат физ., если известно, что теплота парообразования составляет  $r=539,0 \text{ ккал/кг}$ .

Ответ:  $\Delta S = 1,444 \text{ ккал/кг}\cdot\text{}^\circ\text{K}$ .

7-7. Определить изменение энтропии 1 кг  $\text{CO}_2$  в процессе сжатия. Начальные параметры углекислоты  $t_1=40^\circ\text{C}$ ,  $p_1=2 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ , конечные  $t_2=253^\circ\text{C}$ ,  $p_2=45 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Расчет сделать в двух вариантах: а) рассчитывая теплоемкость углекислоты по молекулярно-кинетической теории; б) учитывая зависимость теплоемкости от температуры, применив для расчета табл. 18 приложений.

### Решение

а) Принимая теплоемкость углекислоты по молекулярно-кинетической теории и учитывая, что молекула  $\text{CO}_2$  имеет линейную структуру, имеем:

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= \frac{8,314 \cdot 7}{2,44,01} 2,303 \lg \frac{526}{313} - \frac{8,314}{44,01} 2,303 \lg \frac{45}{2} = \\ &= 0,3435 - 0,5883 = -0,2448 \text{ кдж/кг}\cdot\text{град}. \end{aligned}$$

б) С помощью табл 18 изменение энтропии рассчитывается следующим образом:

$$s_2 - s_1 = s_2^{\text{табл}} - s_1^{\text{табл}} - R \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

Величины  $s_2^{\text{табл}}$  и  $s_1^{\text{табл}}$  находятся соответственно по температурам  $t_2$  и  $t_1$ . Переводя значение табличных энтропий в ккал/моль, получаем:

$$s_2 - s_1 = (0,1432 - 0,0257) \cdot 4,1868 - \\ - 0,5883 = -0,0964 \text{ ккал/моль}.$$

Результаты расчетов а и б сильно отличаются друг от друга, потому что вычисление теплоемкости при помощи молекулярно-кинетической теории для  $\text{CO}_2$  приводит к плохим результатам.

Для расчета можно с успехом воспользоваться и таблицами ВТИ [Л 3]. Формула будет выглядеть аналогично.

$$s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

7-8. Расчет вероятности термодинамического состояния имеет смысл производить для систем (газов), состоящих из большого числа частиц. Однако в учебных целях для ознакомления с этой величиной можно произвести расчет для малых чисел.

Пусть имеется объем, мысленно разделенный на 4 части, в котором находятся 8 молекул.

Определить вероятность термодинамического состояния  $\omega$  для трех случаев распределения молекул, указанных на рис. 7-1.

#### Решение

Вероятность термодинамического состояния рассчитывается по формуле

$$\omega = \frac{N!}{N_1! N_2! N_3! \dots},$$

где  $N$  — общее число молекул, а  $N_1!$ ,  $N_2!$ ,  $N_3!$ ... — число молекул данной группы. Для первого случая распределения

$$\omega_1 = \frac{N!}{N_1! N_2! N_3! N_4!} = \frac{8!}{2! 2! 2! 2!} = 2520;$$

для второго

$$\omega_2 = \frac{N_1!}{N_1!} = \frac{8!}{8!} = 1;$$

для третьего

$$\omega_3 = \frac{N!}{N_1! N_2! N_3!} = \frac{8!}{1! 3! 4!} = 280.$$

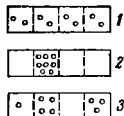


Рис 7-1. К задаче 7-8.



7-9. В объеме находятся 6 молекул. Определить, как часто будет наблюдаться такое состояние, что все молекулы соберутся в левой половине объема. Сделать тот же расчет для 16 молекул.

Ответ: При наблюдении за шестью молекулами на каждые 20 наблюдений равномерного распределения будет в среднем зафиксирован один случай, когда молекулы соберутся в одной половине сосуда. При наблюдении за 16 молекулами один такой же случай будет зафиксирован в среднем на 90 090 наблюдений равномерного распределения молекул.

7-10. Температура газов, выходящих из земли, для некоторых горячих источников доходит до  $180^{\circ}\text{C}$ .

Определить максимальный термический к. п. д., который имел бы тепловой двигатель, превращающий тепло этого источника в работу. Температура среды равна  $20^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $\eta_t = 0,353$ .

7-11. В паротурбинной установке средняя температура водяного пара в процессе нагревания его за счет сгоревшего топлива равна  $350^{\circ}\text{C}$ . Температура конденсации пара равна  $28^{\circ}\text{C}$ .

Определить термический к. п. д. ПТУ и теоретическую мощность установки. Известно, что в этой установке сжигается  $50 \text{ т/ч}$  топлива с теплотой сгорания  $Q_n^p = 4\,000 \text{ ккал/кг}$ .

Ответ:  $\eta_t = 0,517$ ;  $N_{\text{теор}} = 120\,000 \text{ кВт}$ .

7-12. Холодильная установка имеет холодопроизводительность  $6\,000 \text{ ккал/ч}$  и создает температуру в охлаждаемом помещении  $t = 10^{\circ}\text{C}$ . Температура помещения, в котором стоит холодильная установка, равна  $20^{\circ}\text{C}$ . Приняв, что холодильная установка работает по обратному циклу Карно, определить холодильный коэффициент  $\epsilon$ , количество тепла  $q_1$ , которое передает установка верхнему тепловому источнику (среде), и теоретическую мощность привода установки  $N_{\text{теор}}$ .

Определить, будет ли нагреваться или охлаждаться помещение после включения холодильной установки и количество тепла  $q''$ ,  $\text{ккал/час}$ , которое будет подводиться (отводиться) к воздуху в комнате.

Ответ:  $\epsilon = 8,77$ ;  $N_{\text{теор}} = 0,795 \text{ кВт}$ ;  $q' = 27\,980 \text{ кдж/ч} = 6\,680 \text{ ккал/ч}$ ;  $q'' = 2\,860 \text{ кдж/ч} = 683 \text{ ккал/ч}$ . Помещение будет нагреваться.

7-13. Определить энтропию  $1 \text{ кг}$  газовой смеси при давлении  $p = 3 \text{ кг/см}^2$  и температуре  $t = 300^{\circ}\text{C}$ , состоящей из азота и аргона. Массовые доли азота и аргона равны  $g_{\text{N}_2} = 0,37$ ,  $g_{\text{Ar}} = 0,63$ . Газы считать идеальными. Принять, что энтропия азота и аргона равна нулю при параметрах  $p_0 = 1 \text{ кг/см}^2$  и  $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$ . Пользоваться табл. 8 приложений.

### Решение

Энтропия смеси равна сумме энтропий отдельных газов и энтропии смешения.

Энтропия  $0,37 \text{ кг/кг см}$  азота равна.

$$s_{\text{N}_2} = \left( s_2 - s_1 - R \ln \frac{p}{p_0} \right) g_{\text{N}_2} = \\ = \left( 0,1854 - 0 - \frac{1,986}{28,016} \cdot 2,303 \lg 3 \right) \cdot 0,37 = 0,0398 \text{ ккал/кг см.}^{\circ}\text{K}.$$

где  $s_2-s_1$  показывает изменение энтропии азота в зависимости от температуры.

При расчете энтропии аргона зависимость теплоемкости от температуры можно не учитывать и расчет производить без применения таблиц термодинамических свойств газов.

Следовательно, энтропия 0,63 кг/кг см. аргона равна:

$$\begin{aligned} s_{\text{Ar}} &= \left( c_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{p}{p_0} \right) g_{\text{Ar}} = \\ &= \left( \frac{1,986 \cdot 5}{2 \cdot 39,944} \lg \frac{573}{273} - \frac{1,986}{39,944} \lg 3 \right) 0,63 \cdot 2,303 = \\ &= 0,0236 \text{ ккал/кг см.}^\circ\text{К.} \end{aligned}$$

Энтропия смешения рассчитывается:

$$\begin{aligned} \Delta s &= g_{\text{Ar}} R_{\text{Ar}} \ln \frac{1}{r_{\text{Ar}}} + g_{\text{N}_2} R_{\text{N}_2} \ln \frac{1}{r_{\text{N}_2}} = \\ &= 0,63 \cdot \frac{1,986}{39,944} \cdot 2,303 \lg \frac{1}{0,5443} + 0,37 \cdot \frac{1,986}{28,016} \times \\ &\times 2,303 \lg \frac{1}{0,4557} = 0,0452 \text{ ккал/кг см.}^\circ\text{К,} \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} r_{\text{Ar}} &= \frac{\frac{g_{\text{Ar}}}{\mu_{\text{Ar}}}}{\frac{g_{\text{Ar}}}{\mu_{\text{Ar}}} + \frac{g_{\text{N}_2}}{\mu_{\text{N}_2}}} = \frac{\frac{0,63}{39,944}}{\frac{0,63}{39,944} + \frac{0,37}{28,016}} = 0,5443; \\ r_{\text{N}_2} &= 0,4557. \end{aligned}$$

Энтропия 1 кг смеси при заданных параметрах равна:

$$\begin{aligned} s &= s_{\text{N}_2} + s_{\text{Ar}} + \Delta s = 0,0398 + 0,0236 + 0,0452 = \\ &= 0,1086 \text{ ккал/кг см.}^\circ\text{К.} \end{aligned}$$

7-14. Определить, насколько увеличится энтропия при смешении 3 кг  $\text{N}_2$  и 2 кг  $\text{CO}_2$ . Газы считать идеальными. Температура и давление газов до смешения одинаковы.

Ответ:  $\Delta S = 0,7725 \text{ кДж/}^\circ\text{К}$ .

7-15. Смесь газов, состоящая из 30% азота и 70% водорода (по объему), находится при  $20^\circ\text{C}$  и  $1,8 \text{ кг/см}^2$ .

Вычислить энтропию 1 кг смеси; считать, что энтропия обоих компонентов при нормальных условиях равна нулю. При расчете учитывать, что теплоемкость газа переменна. Считать, что между азотом и водородом не происходит химической реакции.

Ответ:  $s = 0,0608 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{К}$ .

7-16. Определить минимальную теоретическую работу разделения 1 кг воздуха на кислород и азот (считать, что воздух состоит из 21 объемной части кислорода и 79 объемных частей азота). Температура среды  $t_{cp} = 15^\circ \text{C}$ . Газы считать идеальными.

### Решение

Минимальная работа, которую необходимо затратить для разделения газов, будет равна потере работоспособности в обратном процессе, т. е. при смешении газов:

$$\Delta I = T_{cp} \Delta S.$$

Изменение энтропии в процессе смешения рассчитывается:

$$\Delta S = g_1 R_1 \ln \frac{1}{r_1} + g_2 R_2 \ln \frac{1}{r_2}.$$

Здесь индексы 1 и 2 относятся к первому и второму газу соответственно, а  $g$  и  $r$  — весовые и объемные доли.

$$\begin{aligned} \Delta S &= 0,2329 \frac{1,986}{32} \cdot 2,303 \lg \frac{1}{0,21} + 0,7671 \times \\ &\times \frac{1,986}{28,016} \cdot 2,303 \lg \frac{1}{0,79} = 0,0354 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ \text{K} - \\ &= 0,1481 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ \text{K}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} g_1 &= \frac{r_1 \mu_1}{r_1 \mu_1 + r_2 \mu_2} = \frac{0,21 \cdot 32}{0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28,016} = 0,2329; \\ g_2 &= 1 - 0,2329 = 0,7671. \end{aligned}$$

Минимальная работа, необходимая для разделения газов, равна:

$$I = \Delta S T_{cp} = 0,1481 \cdot 288 = 42,65 \text{ кДж/кг}.$$

7-17. Известно, что энтропия смеси газов больше, чем энтропия отдельных компонентов смеси на величину, называемую «энтропией смешения». С другой стороны, известно, что энтропия является аддитивной функцией.

Как устраняется это противоречие?

### Решение

Доказательство ведется на примере смеси из двух идеальных газов.

Общая формула для вычисления энтропии 1 кг смеси  $s_{p,t}$  при параметрах  $p$  и  $t$  записывается:

$$s_{p,t} = g_1 (s_1)_{p,t} + g_2 (s_2)_{p,t} + \Delta s_{смеш} \quad (1)$$

или

$$s_{p,t} = g_1 (s_1)_{p,t} + g_2 (s_2)_{p,t} + g_1 R_1 \ln \frac{1}{r_1} + g_2 R_2 \ln \frac{1}{r_2}. \quad (2)$$

Здесь  $(s_1)_{p,t}$  и  $(s_2)_{p,t}$  — энтропии 1 кг первого и второго компонентов при параметрах смеси;  $g$  и  $r$  — соответственно весовые и молярные (объемные) доли.

В этой записи аддитивность энтропии не проявляется. Причина этого заключается в том, что если смесь газов находится при давлении  $p$  и температуре  $t$ , то отдельные газы в смеси находятся хотя и при той же температуре, но при своих парциальных давлениях. Если же написать энтропии отдельных компонентов при парциальных давлениях и сложить эти энтропии, то получится формула, в точности совпадающая с (2). Тем самым аддитивность энтропии будет доказана, т. е. будет доказана справедливость формулы

$$s_{p,t} = g_1 (s_1)_{p_1^{\text{парц}}, t} + g_2 (s_2)_{p_2^{\text{парц}}, t}. \quad (3)$$

Проследим это доказательство.

Энтропия  $g_1$ , кг/кг, первого газа при параметрах  $p_1^{\text{парц}}, t$  запишется:

$$\begin{aligned} g_1 (s_1)_{p_1^{\text{парц}}, t} &= g_1 (s_1)_{p,t} - g_1 R_1 \ln \frac{p_1^{\text{парц}}}{p} = \\ &= g_1 (s_1)_{p,t} + g_1 R_1 \ln \frac{p}{p_1^{\text{парц}}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Известно, что в смеси газов парциальное давление газа и давление смеси связаны с помощью формулы

$$p_1^{\text{парц}} = r_1 p. \quad (5)$$

Используя это соотношение, формулу (4) записываем так:

$$g_1 (s_1)_{p_1^{\text{парц}}, t} = g_1 (s_1)_{p,t} + g_1 R_1 \ln \frac{1}{r_1} \quad (6)$$

и аналогично для второго газа

$$g_2 (s_2)_{p_2^{\text{парц}}, t} = g_2 (s_2)_{p,t} + g_2 R_2 \ln \frac{1}{r_2}. \quad (7)$$

Суммируя (6) и (7), видим, что в левой части равенства оказывается выражение для энтропии смеси по формуле (3), а в правой — по формуле (2).

Таким образом, тождественность формул (2) и (3) доказана и тем самым доказана аддитивность энтропии и для случая смешения газов.

**7-18.** Стальной шар массой 10 кг при 500° С погружается в сосуд с 18 кг воды, температура которой равна 15° С.

Определить изменение энтропии системы в этом процессе. Подсчитать также изменение энтропии системы, предполагая дополнительно, что шар находится под водой и падает с высоты 15 м.

Теплоемкость стали принять равной  $0,5129 \text{ кдж/кг} \cdot \text{град}$ . Теплоемкость воды равна  $1 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$ .

Ответ:  $\Delta S = 3,132 \text{ кдж/}^\circ\text{К}$ . За счет падения шара с высоты  $15 \text{ м}$  энтропия увеличивается незначительно. В этом случае  $\Delta S = 3,136 \text{ кдж/}^\circ\text{К}$ .

7-19. Камень массой  $m = 1,2 \text{ кг}$  падает с высоты  $h = 14 \text{ м}$  на землю.

Определить вызванное этим процессом изменение энтропии системы камень — земля. Температура камня и окружающей среды равна  $20^\circ \text{С}$ .

#### Решение

Изменение энтропии системы в данном необратимом процессе можно вычислить из формулы потери работоспособности. Потеря работоспособности равна убыли потенциальной энергии, т. е.  $\Delta I = T_{\text{ср}} \Delta S = mgh$ .

Отсюда

$$\Delta S = \frac{mgh}{T_{\text{ср}}} = \frac{1,2 \cdot 9,81 \cdot 14}{293} = 0,562 \text{ дж/}^\circ\text{К}.$$

7-20. Определить максимальную работоспособность  $I'$ , которую имеют  $100 \text{ ккал}$  тепла при температуре пламени в котельном агрегате, т. е. примерно при  $t = 1500^\circ \text{С}$ . Определить, чему будет равна максимальная работоспособность  $I''$  этого же количества тепла, когда оно будет передано водяному пару при температуре  $t = 600^\circ \text{С}$ . Температура среды равна  $20^\circ \text{С}$ .

Ответ:  $I' = 83,5 \text{ ккал}$ ;  $I'' = 66,4 \text{ ккал}$ .

7-21. В регенеративном теплообменнике газотурбинной установки воздух нагревается за счет выхлопных газов, выходящих из турбины. Воздух нагревается от температуры  $t_1 = 140^\circ \text{С}$  до температуры  $t_2 = 270^\circ \text{С}$ ; соответственно этому выхлопные газы охлаждаются от  $t_3 = 340^\circ \text{С}$  до  $t_4 = 210^\circ \text{С}$ .

Определить потерю работоспособности ГТУ в результате такого теплообмена в расчете на  $1 \text{ кг}$  проходящего газа. Газ считать идеальным, обладающим свойством воздуха, а теплоемкость принять по молекулярно-кинетической теории. Температура окружающей среды  $20^\circ \text{С}$ . Считать, что теплообменник не имеет тепловых потерь.

#### Решение

Потеря работоспособности рассчитывается по формуле Гюн-Стодола  $\Delta I = T_{\text{ср}} \Delta S$ , где  $T_{\text{ср}}$  — абсолютная температура среды, а  $\Delta S$  — изменение энтропии системы при рассматриваемом необратимом процессе.

Изменение энтропии системы будет складываться из уменьшения энтропии охлаждающегося в теплообменнике газа  $\Delta S_1$  и увеличения энтропии нагревающегося воздуха  $\Delta S_2$ , т. е.

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2.$$

Уменьшение энтропии газа (в расчете на  $1 \text{ кг}$  проходящего газа) равно:

$$\Delta S_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{1,986 \cdot 7}{2 \cdot 28,96} \cdot 2,303 \lg \frac{483}{613} = -0,05721 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{К}.$$

Увеличение энтропии воздуха равно:

$$\Delta s_2 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{1,986 \cdot 7}{2 \cdot 28,96} \cdot 2,303 \lg \frac{543}{413} = 0,06567 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{К}.$$

Изменение энтропии системы равно:

$$\Delta s = \Delta s_1 + \Delta s_2 = -0,05721 + 0,06567 = +0,00846 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{К},$$

т. е. энтропия системы увеличилась.

Потеря работоспособности подсчитывается:

$$\Delta l = 0,00846 \cdot 293 = 2,479 \text{ ккал/кг} = 10,379 \text{ кДж/кг}.$$

Необходимо еще раз заметить, что рассчитываемый теплообменник не имеет тепловых потерь в окружающую среду, а потеря работоспособности возникает исключительно вследствие необратимого теплообмена с конечной разностью температур.

Увеличение энтропии системы хорошо видно на рис. 7-2. Так как тепло, отданное газом, равно теплу, принятому воздухом, то имеет место следующее равенство площадей:

$$\text{пл. } 34ab3 = \text{пл. } 12ca1.$$

**7-22.** Определить потерю работоспособности вследствие теплообмена в регенеративном теплообменнике газотурбинной установки. Воздух в теплообменнике нагревается от температуры  $t_1 = 160^\circ\text{С}$ , а газы охлаждаются от температуры

$t_2 = 400^\circ\text{С}$  до  $t_3 = 240^\circ\text{С}$ . Тепловые потери теплообменника равны 10% от тепла, отдаваемого газом.

Выхлопные газы, выходящие из турбины, и воздух считать идеальными газами, обладающими свойствами воздуха, а теплоемкость принять по молекулярно-кинетической теории. Температура окружающей среды равна  $15^\circ\text{С}$ . Потерю работоспособности рассчитать на 1 кг проходящего газа (и воздуха).

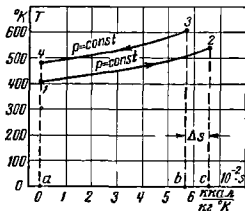


Рис 7-2. К задаче 7-21.

### Решение

Сначала необходимо рассчитать температуру  $t_4$ , до которой будет нагреваться воздух. Из уравнения теплового баланса

$$0,9c_p(t_2 - t_3) = c_p(t_4 - t_1)$$

получаем:

$$t_4 = 0,9(t_2 - t_3) + t_1 = 0,9(400 - 240) + 160 = 304^\circ\text{С}.$$

Тепловые потери в расчете на 1 кг проходящего газа равны:

$$q = 0,1c_p(t_2 - t_3) = 0,1 \cdot \frac{1,986 \cdot 7}{2 \cdot 28,96} (400 - 240) = 3,8403 \text{ ккал/кг}.$$

В формуле Гюй-Сюдора  $\Delta I = T_{cp} \Delta s$ ; изменение энтропии системы  $\Delta s$  будет складываться из изменения энтропии газа  $\Delta s_1$ , воздуха  $\Delta s_2$  и увеличения энтропии среды  $\Delta s_3$  за счет передачи части тепла среде в результате теплопотерь.

Уменьшение энтропии газа  $\Delta s_1$  равно:

$$\Delta s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{1,986 \cdot 7}{2 \cdot 28,96} \cdot 2,303 \lg \frac{513}{673} = -0,06515 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{К}.$$

Увеличение энтропии воздуха  $\Delta s_2$  равно:

$$\Delta s_2 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{1,986 \cdot 7}{2 \cdot 28,96} \cdot 2,303 \lg \frac{577}{433} = +0,06889 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{К}.$$

Увеличение энтропии среды равно:

$$\Delta s_3 = \frac{q}{T_{cp}} = \frac{3,8403}{288} = +0,01333 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{К}.$$

Увеличение энтропии системы равно:

$$\Delta s = \Delta s_1 + \Delta s_2 + \Delta s_3 = -0,06515 + 0,06889 + 0,01333 = +0,01707 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{К}.$$

Потеря работоспособности

$$\Delta I = T_{cp} \Delta s = 288 \cdot 0,01707 = 4,916 \text{ ккал/кг} = 20,582 \text{ кДж/кг}.$$

7-23. Определить потерю работоспособности, происходящую в тепловыделяющем элементе атомного реактора, где выделяющееся в процессе ядерной реакции тепло поглощается водой, протекающей при давлении 100 кг/см<sup>2</sup>. Вода нагревается от  $t_1 = 190^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 280^\circ\text{C}$ ; температура тепловыделяющего элемента постоянна по высоте его и равна  $t_3 = 380^\circ\text{C}$ . Расчет потери вести на 100 ккал переданного тепла. Температура окружающей среды  $t_{cp} = 20^\circ\text{C}$ . Считать, что тепловые потери отсутствуют.

### Решение

Потеря работоспособности равна  $T_{cp} \Delta S$ , где  $\Delta S$  — изменение энтропии системы. При этом  $\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2$ . Здесь  $\Delta S_1$  — изменение энтропии тепловыделяющего элемента, а  $\Delta S_2$  — изменение энтропии воды в процессе ее нагревания.

$$\Delta S_1 = -\frac{Q}{T_3} = -\frac{100}{653} = -0,1531 \text{ ккал/}^\circ\text{К}.$$

$$\Delta S_2 = m c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = 1 \cdot 2,303 \lg \frac{553}{463} \cdot 1,111 = 0,1970 \text{ ккал/}^\circ\text{К},$$

где  $m$  — масса воды, поглотившая 100 ккал тепла. Она равна:

$$m = \frac{Q}{t_3 - t_1} = \frac{100}{280 - 190} = 1,111 \text{ кг}.$$

Увеличение энтропии системы:

$$\Delta S = 0,1970 - 0,1531 - 0,0439 \text{ ккал/}^\circ\text{K}.$$

Потеря работоспособности равна:

$$\Delta L = T_{\text{ср}} \Delta S = 293 \cdot 0,0439 = 12,86 \text{ ккал}.$$

Процесс передачи тепла можно изобразить в  $TS$ -диаграмме (рис. 7-3), совместив начала отсчета энтропии. Так как тепловых потерь нет, а площадь под линией процесса в  $TS$ -диаграмме изображает тепло, то имеет место следующее равенство площадей:  $\text{пл } 34ab3 = \text{пл } 12ca1$ .

7-24. В противоточном теплообменнике воздух охлаждается от температуры  $t_1 = 240^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 60^\circ\text{C}$ . Охлаждение производится за счет воды, которая нагревается от температуры  $t_3 = 15^\circ\text{C}$  до  $t_4 = 32^\circ\text{C}$ .

Определить изменение энтропии системы вода — воздух в течение 1 ч. Расход охлаждающей воды равен  $m_{\text{вод}} = 250 \text{ кг/ч}$ . Теплоемкость воздуха принять постоянной, равной  $0,21 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$ ;  $c_p$  воды равна  $1 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$ . Считать, что теплообменник не имеет тепловых потерь.

Ответ:  $\Delta S \text{ } 4,16 \text{ ккал/}^\circ\text{K} \cdot \text{ч} = 17,42 \text{ кдж/}^\circ\text{K} \cdot \text{ч}$ .

7-25. Определить потерю работоспособности, происходящую в процессе конденсации водяного пара в конденсаторе паровой турбины. Процесс конденсации пара происходит при давлении  $p = 0,04 \text{ кг/см}^2$ . Температура окружающей среды равна  $t_{\text{ср}} = -5,0^\circ\text{C}$ . Расчет произвести на 1 кг конденсирующегося пара. Считать, что в конденсатор поступает сухой насыщенный пар.

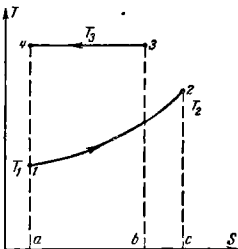


Рис. 7-3. К задаче 7-23.

### Решение

Изменение энтропии системы в рассматриваемом процессе равно:

$$\Delta S = \Delta S_{\text{пара}} + \Delta S_{\text{ср}};$$

$$\Delta S_{\text{пара}} = - \frac{581,1}{28,6 + 273,2} = -1,925 \text{ ккал/кг} \cdot \text{}^\circ\text{K},$$

где теплота парообразования при давлении  $p = 0,04 \text{ кг/см}^2$  равна  $r = 581,1 \text{ ккал/кг}$ , а температура конденсации, соответствующая  $p = 0,04 \text{ кг/см}^2$ , равна  $t = 28,6^\circ\text{C}$ . Так как отведенное тепло передается окружающей среде, то увеличение энтропии среды рассчитывается:

$$\Delta S_{\text{ср}} = + \frac{581,1}{268,2} = +2,167 \text{ ккал/кг} \cdot \text{}^\circ\text{K}.$$



## Изменение энтропии системы

$$\Delta s = 2,167 - 1,925 = 0,242 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{K}.$$

Потеря работоспособности равна:

$$\Delta I = 268,2 \cdot 0,242 = 64,8 \text{ ккал/кг} = 271,6 \text{ кДж/кг}.$$

7-26. Кислород  $O_2$ , имея начальные параметры  $p_1 = 40 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1 = 620^\circ\text{C}$ , изменяет свое состояние в изэнтропическом процессе так, что его давление  $p_2 = 12 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

Найти конечную температуру  $t_2$ , считая теплоемкости зависящими от температуры и не зависящими от давления. Для расчета пользоваться табл. 9 приложений, применив метод «конечной энтропии».

## Решение

Изменение энтропии 1 кмоль любого идеального газа в произвольном процессе можно записать:

$$\mu s_2 - \mu s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \mu c_p \frac{dT}{T} - \mu R \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

В этом выражении интеграл представляет собой изменение энтропии 1 кмоль газа в процессе  $p = \text{const}$  и, следовательно, может быть получен непосредственно из таблиц, так как в них приведены энтропии газов, изменяющиеся в процессе  $p = 1 \text{ кг/см}^2 = \text{const}$ , а изменение энтропии идеального газа в любом изобарическом процессе одно и то же, если начальные и конечные температуры одинаковы.

Следовательно,

$$\int_{T_1}^{T_2} \mu c_p \frac{dT}{T} = \mu s_2^{\text{табл}} - \mu s_1^{\text{табл}},$$

а расчетная формула, справедливая для любого процесса, переписывается

$$\mu s_2 - \mu s_1 = \mu s_2^{\text{табл}} - \mu s_1^{\text{табл}} - \mu R \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

По условиям задачи — процесс изэнтропический, поэтому

$$\mu s_2^{\text{табл}} - \mu s_1^{\text{табл}} - \mu R \ln \frac{p_2}{p_1} = 0.$$

Отсюда

$$\mu s_2^{\text{табл}} = \mu s_1^{\text{табл}} + \mu R \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

Зная  $\mu s_2^{\text{табл}}$ , прямо из таблиц находится искомая конечная температура  $t_2$ .

Проделаем этот расчет:

$$\mu s_2^{\text{табл}} = 8,819 + 1,986 \cdot 2,303 \lg \frac{12}{40} = 6,427 \text{ ккал/кмоль} \cdot ^\circ\text{K};$$

$$t_2 = f(6,427) = 389,3^\circ \text{C}.$$

Условия этой задачи те же, что и условия задачи 6-24. Там, в чисто учебных целях, был проделан громоздкий расчет методом «среднего  $k$ ». Как мы видим, задача решается очень просто и совершенно строго методом «конечной энтропии». Поэтому его и следует применять в практических расчетах.

7-27. 1 кмоль  $\text{CO}_2$  при начальных параметрах  $p_1 = 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1 = 37^\circ \text{C}$  сжимается изоэнтропически до тех пор, пока его давление не становится равным  $p_2 = 30 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

Определить конечную температуру процесса.

Ответ:  $t_2 = 333^\circ \text{C}$ .

7-28. Воздух в состоянии при  $p_1 = 6 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1 = 700^\circ \text{C}$  расширяется изоэнтропически до тех пор, пока его удельный объем не становится равным  $v_2 = 4,657 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Определить температуру  $t_2$  воздуха в конечном состоянии. Пользоваться табл. II приложений, применив метод «конечной энтропии».

### Решение

Изменение энтропии идеального газа в любом процессе:

$$\mu s_2 - \mu s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \mu c_v \frac{dT}{T} + \mu R \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

Заменив по уравнению Майера  $\mu c_v = \mu c_p - \mu R$ , получим:

$$\mu s_2 - \mu s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \mu c_p \frac{dT}{T} - \int_{T_1}^{T_2} \mu R \frac{dT}{T} + \mu R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

или

$$\mu s_2 - \mu s_1 = \mu s_2^{\text{табл}} - \mu s_1^{\text{табл}} - \mu R \ln \frac{T_2}{T_1} + \mu R \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

Находим конечную табличную энтропию, учитывая, что  $\Delta(\mu s) = 0$ :

$$\mu s_2^{\text{табл}} = \mu s_1^{\text{табл}} + \mu R \ln \frac{T_2}{T_1} - \mu R \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

По величине  $\mu s_2^{\text{табл}}$  можно было бы из таблиц найти искомую  $t_2$ . Однако дело осложняется тем, что в правую часть расчетной формулы также входит искомая  $T_2$ . Поэтому, решать это трансцендентное уравнение следует, применяя метод последовательных приближений.

Проделаем численный расчет.

Перепишем нашу расчетную формулу

$$\lg \frac{v_2}{v_1} = \lg T_2 - \frac{\mu s_2^{\text{табл}}}{2,303 \mu R} + \frac{\mu s_1^{\text{табл}}}{2,303 \mu R} - \lg T_1$$

Удельный объем в начале процесса

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{8314 \cdot 973,15}{28,96 \cdot 6 \cdot 10^5} = 0,4657 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Следовательно,

$$\lg \frac{v_2}{v_1} = \lg \frac{4,657}{0,4657} = 1.$$

Зададимся теперь двумя произвольными значениями  $t_2$  (во избежание слишком большой ошибки можно предварительно подсчитать  $T_2 = T_1(v_1/v_2)^k$ , приняв  $k = 1,4$ ):

$$1) t_2 = 100^\circ \text{С} \quad \text{и} \quad 2) t_2 = 200^\circ \text{С}$$

и подсчитаем для них соответственные величины  $\lg(v_2/v_1)$ , взяв  $\mu s_2^{\text{табл}}$  и  $\mu s_1^{\text{табл}}$  из таблиц по температурам  $t_2$  и  $t_1$ .

$$1) \lg \frac{v_2}{v_1} = \lg 373,15 - \frac{2,164}{2,303 \cdot 1,986} + \frac{9,189}{2,303 \cdot 1,986} - \\ - \lg 310,15 = 2,5719 - 0,4661 + 1,9792 - 2,9882 = 1,0968.$$

$$2) \lg \frac{v_2}{v_1} = \lg 473,15 - \frac{3,834}{2,303 \cdot 1,986} + 1,9792 - 2,9882 = 0,8402.$$

Истинное, нужное нам значение  $\lg(v_2/v_1)$  должно быть равным единице. Имеем, следовательно, такие соотношения:

| $t_2, ^\circ\text{С}$ | $\lg(v_2/v_1)$ |
|-----------------------|----------------|
| 100                   | 1,0968         |
| $t_{2,\text{иск}} =$  | 1,0000         |
| 200                   | 0,8402         |

Искомую действительную  $t_{2,\text{иск}}$  можно найти при помощи линейной интерполяции:

$$t_{2,\text{иск}} = \frac{1,0968 - 1,0000}{1,0968 - 0,8402} \cdot 100 + 100 = 138^\circ \text{С}.$$

7-29. Водород  $\text{H}_2$ , имея начальные параметры  $p_1 = 0,97 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1 = 27,0^\circ \text{С}$ , изэнтропически сжимается до тех пор, пока его удельный объем не становится равным  $v_2 = 1,800 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Определить конечную температуру  $t_2$  при помощи табл 12 приложенный, используя метод «конечной энтропии».

Ответ:  $t_2 = 389^\circ \text{С}$ .

## 8. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

8-1. Вычислить значения констант в уравнении Ван-дер-Ваальса с помощью параметров критического состояния двуокиси углерода  $\text{CO}_2$ , которые равны:

$$p_{кр} = 73,8 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2; \quad t_{кр} = 31,04^\circ\text{C}; \quad v_{кр} = 0,00214 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

У к а з а н и е. В уравнении Ван-дер-Ваальса необходимо вычислять две константы:  $a$  и  $b$ . Постоянная  $R = \frac{8314}{\mu}$  дж/кг·град не

может быть взята произвольно. Любой другой выбор приведет к тому, что уравнение Ван-дер-Ваальса не перейдет в уравнение состояния идеального газа  $pv = RT$  при  $p \rightarrow 0$ .

Постоянные  $a$  и  $b$  вычисляются путем совместного решения следующих трех уравнений, которые связывают  $a$  и  $b$  с критическими параметрами:

$$p_{кр} = \frac{a}{27b^2}; \quad v_{кр} = 3b; \quad T_{кр} = \frac{8a}{27bR}.$$

Так как в этих уравнениях содержатся только два неизвестных, решение получается неопределенным. В зависимости от того, какая пара критических параметров используется для расчета, получаются различные значения констант  $a$  и  $b$ .

Ответ:

| Критические параметры,<br>выбранные для расчета | $a$ , н·м <sup>4</sup> /кг <sup>2</sup> | $b$ , м <sup>3</sup> /кг |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------|
| $v_{кр}$ и $p_{кр}$                             | 101,4                                   | 0,000713                 |
| $v_{кр}$ и $T_{кр}$                             | 140,4                                   | 0,000713                 |
| $p_{кр}$ и $T_{кр}$                             | 190,9                                   | 0,000984                 |

8-2. В баллоне объемом  $V = 40 \text{ дм}^3$  находится двуокись углерода при давлении  $p = 39,23 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

Определить массу газа в баллоне, если температура газа равна  $t = 20^\circ\text{C}$ . Расчет произвести при помощи уравнений а) Клапейрона и б) Ван-дер-Ваальса. В случае «б» использовать величины констант  $a$  и  $b$ , подсчитанные в задаче 8-1 по  $p_{кр}$  и  $T_{кр}$ .\*

Определить соответствующие погрешности по сравнению с массой, вычисленной по табличному значению удельного объема, равному  $v_{табл} = 0,01063 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

### Решение

а) Из уравнения Клапейрона определяем удельный объем

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{8314 \cdot 293,15}{44,01 \cdot 39,23 \cdot 10^5} = 0,01411 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

\* Для подсчета вандерваальсовских констант рекомендуется пользоваться именно этой парой критических параметров, так как удельный объем в критической точке определяется в опыт с меньшей точностью, чем  $p_{кр}$  и  $t_{кр}$ .

Искомая масса газа

$$m = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{0,01411} = 2,836 \text{ кг.}$$

б) По уравнению Ван-дер-Ваальса удельный объем находится методом последовательного приближения. Приняв в первом приближении величину удельного объема  $v$  равной величине, подсчитанной по уравнению Клапейрона, определяем значение давления  $p = RT/(v-b) - a/v^2$ , приняв согласно условию, что  $a = 190,9 \text{ Н} \cdot \text{м}^4/\text{кг}^2$ ,  $b = 0,000984 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;

$$p = \frac{8314 \cdot 293,15}{44,01 (0,01411 - 0,00098)} - \frac{190,9}{0,01411^2} = 32,63 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2.$$

Мы получили значение  $p$ , меньшее, чем заданное в условиях задачи. Поэтому принимаем другое, меньшее значение  $v = 0,01200 \text{ м}^3/\text{кг}$ , и снова подсчитываем величину  $p$ , которая ока-

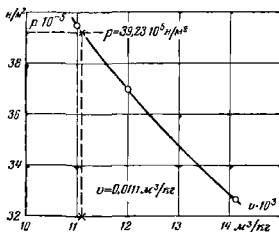


Рис 8-1. К задаче 8-2.

зывается равной  $p = 37,00 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ . Задаемся в третий раз величиной  $v = 0,01100 \text{ м}^3/\text{кг}$ , тогда  $p = 39,49 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ .

Мы вычислили три точки изотермы  $t = 20^\circ \text{С}$  по Ван-дер-Ваальсу. Строим этот отрезок изотермы в координатах  $p-v$  и по графику (рис. 8-1) находим нужное нам значение удельного объема  $v = 0,0111 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Проверка уравнения показывает, что эта величина правильная.

Определяем искомую массу вещества по Ван-дер-Ваальсу и по  $v_{\text{табл}}$ :

$$m_{\text{В-В}} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{0,01110} = 3,604 \text{ кг};$$

$$m_{\text{табл}} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{0,01063} = 3,763 \text{ кг.}$$

Погрешности, допущенные при вычислениях:

$$\delta_{\text{мд}} = \frac{2,836 - 3,763}{3,763} \cdot 100 = -24,6\%;$$

$$\delta_{В-В} = \frac{3,604 - 3,763}{3,763} \cdot 100 = -4,2\%$$

8-3. Вычислить коэффициенты  $a$  и  $b$  уравнения Ван-дер Ваальса, исходя из критических параметров для кислорода:  $p_{кр}=49,7$  кг/см<sup>2</sup>;  $t_{кр}= -118,82^\circ\text{C}$

Ответ:  $a=14,1$  м<sup>4</sup>/кг;  $b=0,001029$  м<sup>3</sup>/кг.

8-4. Вычислить значения констант уравнения Ван-дер-Ваальса с помощью критических параметров для воды, равных:  $p_{кр}=225,65 \cdot 10^4$  кг/м<sup>2</sup>;  $v_{кр}=0,00326$  м<sup>3</sup>/кг;  $t_{кр}=374,15^\circ\text{C}$

Использовать все три возможных сочетания критических параметров

Ответ:

| Критические параметры, выбранные для определения констант | $a$ ,<br>м <sup>4</sup> /кг | $b$ ,<br>м <sup>3</sup> /кг |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| $v_{кр}$ и $p_{кр}$                                       | 71,99                       | 0,001087                    |
| $v_{кр}$ и $T_{кр}$                                       | 111,7                       | 0,001087                    |
| $p_{кр}$ и $T_{кр}$                                       | 173,4                       | 0,001687                    |

8-5. Определить с помощью уравнения Ван-дер-Ваальса давление водяного пара, если при этом его температура  $t=400^\circ\text{C}$ , и удельный объем  $v=0,00306$  м<sup>3</sup>/кг.

Расчет провести для трех вариантов соответственно трем вариантам возможных пар констант для уравнения Ван-дер-Ваальса (см. ответ задачи 8-4).

Сравнить с действительным значением давления, которое равно при этих параметрах 300 кг/см<sup>2</sup>.

Ответ:  $p_1=836,9$ ;  $p_2=414$ ;  $p_3=457$  кг/см<sup>2</sup>.

8-6. Ниже даны табличные [Л 4] значения удельных объемов водяного пара при следующих температурах и давлениях:

| $p$ , кг/см <sup>2</sup> | 50      | 100     | 300     | 600     | 800     |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $t$ , °C                 | 500     | 350     | 400     | 400     | 600     |
| $v$ , м <sup>3</sup> /кг | 0,06999 | 0,02307 | 0,00306 | 0,00165 | 0,00345 |

Рассчитать значения удельных объемов при этих же параметрах, пользуясь теорией подобия (с помощью  $z$ -диаграммы, рис 8-2), и вычислить ошибку по сравнению с действительными значениями.

Критические параметры для воды даны в задаче 8-4.

Ответ: Ошибка составляет  $\delta_1=2,91$ ;  $\delta_2=0,5$ ;  $\delta_3=17,0$ ;  $\delta_4=19,9$ ;  $\delta_5=2,7\%$ .

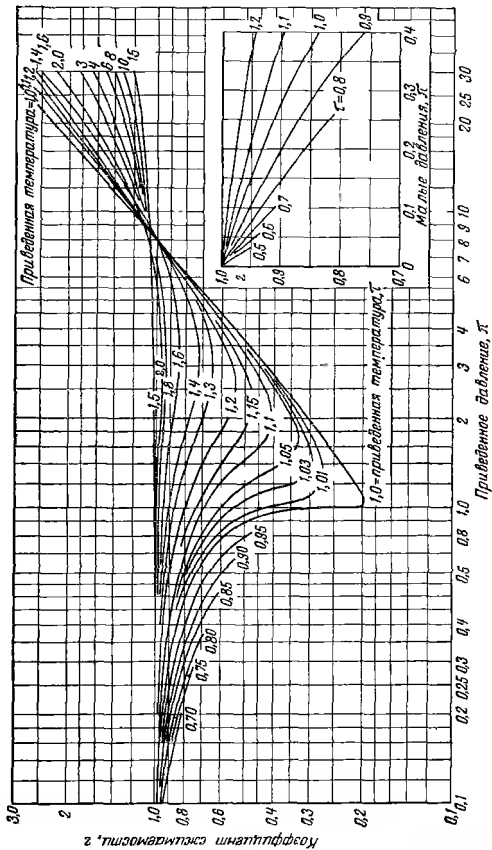


Рис. 8-2. К задачам 8-6, 8-7, 8-8.

8-7. Удельные объемы паров этилового спирта в зависимости от температуры и давления даны в таблице.

|                            |         |         |         |          |
|----------------------------|---------|---------|---------|----------|
| $p, \text{ кг/см}^2$       | 50      | 100     | 300     | 350      |
| $t, ^\circ\text{C}$        | 250     | 300     | 350     | 350      |
| $v, \text{ м}^3/\text{кг}$ | 0,01437 | 0,00648 | 0,00245 | 0,002287 |

Пользуясь диаграммой  $z\pi$ , рассчитать значения удельных объемов паров этилового спирта; вычислить ошибку по сравнению с действительными значениями. Критическая температура этилового спирта равна  $t_{кр} = 250,8^\circ\text{C}$ ; критическое давление  $p_{кр} = 72,5 \text{ кг/см}^2$ .

Ответ:  $\delta_1 = 7,4$ ;  $\delta_2 = 23,5$ ;  $\delta_3 = 4,9$ ;  $\delta_4 = 0,1\%$

8-8. Пользуясь теорией подобия (с помощью  $z\pi$ -диаграммы), подсчитать значения удельных объемов двуокиси углерода  $\text{CO}_2$  при соответствующих параметрах и сравнить их с действительными значениями, приведенными в таблице

|                            |         |         |         |
|----------------------------|---------|---------|---------|
| $p, \text{ кг/см}^2$       | 100     | 180     | 200     |
| $t, ^\circ\text{C}$        | 80      | 100     | 180     |
| $v, \text{ м}^3/\text{кг}$ | 0,00363 | 0,00241 | 0,00363 |

Найти относительную ошибку в процентах.

Ответ:  $\delta_1 = 3,25$ ;  $\delta_2 = 7,0$ ;  $\delta_3 = 4,96\%$ .

8-9. С помощью дифференциального уравнения термодинамики  $(\partial u/\partial v)_T = -p + T(\partial p/\partial T)_v$  доказать, что внутренняя энергия идеального газа не зависит от объема.

8-10. Показать с помощью дифференциального уравнения термодинамики  $(\partial c_v/\partial v)_T = T(\partial^2 p/\partial T^2)_v$ , что теплоемкость  $c_v$  идеального газа не зависит от объема.

8-11. Показать, что теплоемкость  $c_v$  для реального газа, подчиняющегося уравнению Ван-дер-Ваальса, не зависит от объема.

8-12. С помощью уравнения Ван-дер Ваальса определить производную  $(\partial u/\partial v)_T$  и выяснить ее физический смысл.

Ответ:  $(\partial u/\partial v)_T = a/v^2$ , т. е. равна величине внутреннего молекулярного давления вандерваальсовского газа

8-13. Теплоемкость  $c_p$  воды при  $t = 20^\circ\text{C}$  и  $p = 1 \text{ кг/см}^2$  равна  $4,1822 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$ .

Составить формулу зависимости теплоемкости воды от давления в интервале от 1 до  $150 \text{ кг/см}^2$ , основываясь на табличных данных по удельным объемам, приведенных ниже:

| Температура, $^\circ\text{C}$ | Давление $p, \text{ кг/см}^2$ |           |           |           |           |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                               | 1                             | 25        | 50        | 100       | 150       |
| 10                            | 0,0010003                     | 0,0009992 | 0,0009981 | 0,0009958 | 0,0009936 |
| 20                            | 0,0010018                     | 0,0010007 | 0,0009997 | 0,0009975 | 0,0009954 |
| 30                            | 0,0010044                     | 0,0010033 | 0,0010022 | 0,0010001 | 0,0009981 |



# Решение

Известно соотношение

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial p}\right)_T = -T \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p,$$

из которого после интегрирования в пределах от  $p_1 = 1 \text{ кг/см}^2$  до  $p$  получаем выражение для  $c_p$  при  $T = \text{const}$ :

$$c_p = c_{p=1} - T \int_{p=1}^p \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p dp.$$

Из теории приближенных вычислений известно, что

$$\frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \approx \frac{\Delta^2 v}{\Delta T^2} = \frac{\Delta^2 v}{\Delta t^2},$$

т. е. что вторую производную можно приближенно заменить отношением вторых табличных разностей, таблицу которых мы, следовательно, и должны составить:

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p=1 \text{ кг/см}^2$ |                              |                                  | $p=25 \text{ кг/см}^2$ |                              |                                  |
|---------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------------|----------------------------------|
|                     | $10^3 v$              | $10^3 (\Delta v / \Delta t)$ | $10^3 (\Delta^2 v / \Delta t^2)$ | $10^3 v$               | $10^3 (\Delta v / \Delta t)$ | $10^3 (\Delta^2 v / \Delta t^2)$ |
| 10                  | 10 003                | 15/10                        | 11/100                           | 9 992                  | 15/10                        | 11/100                           |
| 20                  | 10 018                |                              |                                  | 10 007                 | 26/10                        |                                  |
| 30                  | 10 044                |                              |                                  | 10 033                 |                              |                                  |

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p=50 \text{ кг/см}^2$ |                              |                                  | $p=100 \text{ кг/см}^2$ |                              |                                  |
|---------------------|------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------------|
|                     | $10^3 v$               | $10^3 (\Delta v / \Delta t)$ | $10^3 (\Delta^2 v / \Delta t^2)$ | $10^3 v$                | $10^3 (\Delta v / \Delta t)$ | $10^3 (\Delta^2 v / \Delta t^2)$ |
| 10                  | 9 981                  | 16/10                        | 9/100                            | 9 958                   |                              | 9/100                            |
| 20                  | 9 997                  |                              |                                  | 9 975                   | 17/10                        |                                  |
| 30                  | 10 022                 |                              |                                  | 10 001                  | 26/10                        |                                  |

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p=150 \text{ кг/см}^2$ |                              |                                  |
|---------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------------|
|                     | $10^3 v$                | $10^3 (\Delta v / \Delta t)$ | $10^3 (\Delta^2 v / \Delta t^2)$ |
| 10                  | 9 936                   | 18/10                        | 9/100                            |
| 20                  | 9 954                   |                              |                                  |
| 30                  | 9 981                   |                              |                                  |

Из этой таблицы видно, что производная  $(\partial^2 v / \partial T^2)_p$  является малой величиной и может быть принята постоянной и не зависящей от давления. Можно принять ее равной:

$$(\partial^2 v / \partial T^2)_p \approx 10^{-8} \text{ м}^3 / \text{кг} \cdot \text{град}^2.$$

Подставляем это значение в формулу для  $c_p$ , в которой величины  $p$  будем брать в  $\text{кг/см}^2$ , и производим интегрирование:

$$c_p = c_{p=1} - 293,15 \cdot 0,00980665 \cdot 10^{-8} \cdot 10^4 (p-1).$$

Здесь

$$c_{p=1} = 4,1822 \text{ кдж/кг} \cdot \text{град};$$

$$293,15 = T, \text{ } ^\circ\text{K};$$

$$0,00980665 \text{ кдж/кг} \cdot \text{м} - \text{переводный коэффициент.}$$

После преобразований получаем окончательно:

$$c_p = 4,1825 - 2,8748 \cdot 10^{-4} p, \text{ кдж/кг} \cdot \text{град}.$$

Подсчитаем по этой формуле  $c_p$  при  $p = 150 \text{ кг/см}^2$ :

$$c_p = 4,1825 - 2,8748 \cdot 10^{-4} \cdot 150 = 4,1394 \text{ кдж/кг} \cdot \text{град}.$$

По экспериментальным данным («Теплоэнергетика», № 10, 1959):  $c_p = 4,1407 \text{ кдж/кг} \cdot \text{град}$ . Таким образом, полученная формула оказывается для данного интервала температур и давлений весьма точной ( $\delta \approx 0,03\%$ ).

8-14. Для водяного пара известны следующие значения удельного объема и энтальпии:

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p = 191,29 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^2$ |                     | $p = 196,2 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^2$ |                     |
|---------------------|----------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
|                     | $v, \text{ м}^3/\text{кг}$             | $i, \text{ кдж/кг}$ | $v, \text{ м}^3/\text{кг}$            | $i, \text{ кдж/кг}$ |
| 500                 | 0,01560                                | 3246,6              | 0,01513                               | 3240                |
| 550                 | 0,01741                                | 3400                | 0,01691                               | 3390                |

Определить приближенно величину производной  $(\partial u / \partial v)_T$  для температур 500 и 550° С в заданном интервале давлений.

Указание: принять, что  $(\partial u / \partial v)_T \approx (\Delta u / \Delta v)_T$ .

Ответ: При  $t = 500^\circ \text{C}$   $(\partial u / \partial v)_T = 125 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^2$ ;

при  $t = 550^\circ \text{C}$   $(\partial u / \partial v)_T = 180 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^2$

8-15. Энтальпия водяного пара при давлении  $p = 100 \text{ кг/см}^2$  и температуре  $t = 500^\circ \text{C}$  равна  $i = 806,1 \text{ ккал/кг}$ .

Определить, пользуясь приведенной ниже таблицей удельных объемов  $v, \text{ м}^3/\text{кг}$ , будет ли энтальпия при  $t = 500^\circ \text{C} = \text{const}$  увеличиваться или уменьшаться с повышением давления.

| $t, ^\circ\text{C}$ | Давление $p, \text{ кг/см}^2$ |         |         |
|---------------------|-------------------------------|---------|---------|
|                     | 100                           | 105     | 110     |
| 490                 | 0,03292                       | 0,03120 | 0,02963 |
| 500                 | 0,03352                       | 0,03177 | 0,03018 |
| 510                 | 0,03411                       | 0,03234 | 0,03073 |

### Решение

Известно, что  $(\partial i / \partial p)_T = [v - T(\partial v / \partial T)_p]$

Заменим  $(\partial v / \partial T)_p$  отношением первых разностей:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \approx (\Delta v / \Delta T)_p,$$

для чего составим таблицу первых разностей удельных объемов по температуре при постоянном давлении:

| t, °C | Давление p, кг/см <sup>2</sup> |                                      |                   |                                      |                   |                                      |
|-------|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|
|       | 100                            |                                      | 105               |                                      | 110               |                                      |
|       | 10 <sup>3</sup> v              | 10 <sup>3</sup> (Δv/Δt) <sub>p</sub> | 10 <sup>3</sup> v | 10 <sup>3</sup> (Δv/Δt) <sub>p</sub> | 10 <sup>3</sup> v | 10 <sup>3</sup> (Δv/Δt) <sub>p</sub> |
| 490   | 3 292                          |                                      | 3 120             |                                      | 2 963             |                                      |
|       |                                | 60/10                                |                   | 57/10                                |                   | 55/10                                |
| 500   | 3 352                          |                                      | 3 177             |                                      | 3 018             |                                      |
|       |                                | 59/10                                |                   | 57/10                                |                   | 55/10                                |
| 510   | 3 411                          |                                      | 3 234             |                                      | 3 073             |                                      |

В интервале давлений 100—105 кг/см<sup>2</sup>:

$$(\partial i / \partial p)_T = 0,03352 - 773,15 \cdot 60 \cdot 10^{-6} = -0,01286.$$

В интервале 105—110 кг/см<sup>2</sup>:

$$(\partial i / \partial p)_T = 0,03177 - 773,15 \cdot 57 \cdot 10^{-6} = -0,01229.$$

Мы видим, что в интервале давлений, заданном нашей таблицей, энтальпия уменьшается, так как производная  $(\partial i / \partial p)_T$  отрицательна.

8-16. Вывести формулу для теплоемкости  $c_v$  газа, подчиняющегося уравнению состояния Берглю.

### Решение

Известно дифференциальное уравнение

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T = T \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v,$$

из которого можно определить величину  $c_v$  для некоторой постоянной температуры:

$$c_v = c_{v,\infty} + T \int_{v=\infty}^v \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v dv.$$

Здесь нижний предел ( $v=\infty$ ) соответствует идеальному состоянию газа.

Производную  $(\partial^2 p / \partial T^2)_v$  согласно условиям задачи необходимо взять при помощи уравнения состояния Берглю, которое имеет следующий вид:

$$\left(p + \frac{a}{Tv^2}\right)(v-b) = RT,$$

или

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{Tv^2}.$$

В этом уравнении величины  $a$  и  $b$  представляют собой ван-дерваальсовские константы.

Берем последовательно первую и вторую производные:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{v-b} + \frac{a}{T^2 v^2};$$

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v = -\frac{2a}{T^3 v^2}$$

и подставляем значение второй производной в выражение подынтегральной функции:

$$\begin{aligned} c_v &= c_{v,\infty} - T \int_{v=\infty}^v \frac{2a}{T^3 v^2} dv = c_{v,\infty} - \frac{2a}{T^2} \int_{v=\infty}^v v^{-2} dv = \\ &= c_{v,\infty} + \frac{2a}{T^2} [v^{-1}]_{\infty}^v = c_{v,\infty} + \frac{2a}{T^2 v}. \end{aligned}$$

Таким образом, для любой температуры искомая формула должна быть записана так:

$$c_v = c_{v,\infty}(T) + \frac{2a}{T^2 v},$$

где  $c_{v,\infty}(T)$  есть теплоемкость газа в идеальном состоянии, зависящая от температуры.

8-17. Составить формулу для теплоемкости  $c_p$  и рассчитать значения энтальпий водяного пара при температуре  $t=600^\circ\text{C}$  и давлениях  $p=1, 100$  и  $200$  кг/см<sup>2</sup>, пользуясь уравнением Берто. Сравнить расчетные величины со следующими табличными [Л. 4] данными:

|                     | Давление $p$ , кг/см <sup>2</sup> |       |       |
|---------------------|-----------------------------------|-------|-------|
|                     | 1                                 | 100   | 200   |
| $i_{600}$ , ккал/кг | 833,0                             | 806,1 | 775,0 |

У к а з а н и е. Уравнению состояния Берто (задача 8-16) часто придают следующий вид, выражая константы Ван-дер-Ваальса через критические параметры:

$$pv = RT \left[ 1 + \frac{9p_{кр}}{128p_{кр}T} \left( 1 - 6 \frac{T_{кр}^2}{T^2} \right) \right].$$

Для решения задачи необходимо воспользоваться выражением для частной производной

$$\left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_T = \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p\right],$$

в которое подставляется величина  $(\partial v / \partial T)_p$ , найденная из приведенного выше уравнения Бертоло.

Значения  $p_{кр}$  и  $T_{кр}$  взять из условий задачи (8-4).

Ответ:

$$i = i_0(T) + \frac{9R p T_{кр}}{128 p_{кр}} \left(1 - \frac{18 T_{кр}^2}{T^2}\right).$$

#### Результаты расчетов

| Энтальпия при<br>$t = 500^\circ \text{C}$ , кДж/кг                                                    | Давление $p$ , кг/см <sup>2</sup> |       |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|
|                                                                                                       | 1                                 | 100   | 200   |
| $i_{\text{расч}}$                                                                                     | 3 488                             | 3 381 | 3 272 |
| $i_{\text{табл}}$                                                                                     | 3 488                             | 3 375 | 3 245 |
| Относительная погрешность<br>$\delta = (i_{\text{расч}} - i_{\text{табл}}) 100 / i_{\text{табл}}$ , % | 0                                 | 0,2   | 0,8   |

8-18. При обработке экспериментальных данных по термодинамическим свойствам большого числа веществ было установлено, что с достаточной для многих практических расчетов точностью удовлетворяется следующая функциональная зависимость:

$$v = f(\pi, \tau, z_{кр}),$$

где  $v$  — удельный объем вещества;

$\pi = \frac{p}{p_{кр}}$  — приведенное давление;

$\tau = \frac{T}{T_{кр}}$  — приведенная температура;

$z_{кр} = \frac{p_{кр} v_{кр}}{R T_{кр}}$  — критический коэффициент сжимаемости.

В зависимости от величины  $z_{кр}$  вещества можно разбить на следующие четыре группы:

I)  $z_{кр} = 0,24 \div 0,26$ ;

II)  $z_{кр} = 0,26 \div 0,28$ ;

III)  $z_{кр} = 0,28 \div 0,30$ ;

IV)  $z_{кр} \leq 0,23$ .

Считают, что вещества, принадлежащие к одной из этих групп, термодинамически подобны, находятся в соответственных состояниях и подчиняются уравнению состояния

$$\varphi = f(\pi, \tau),$$

свойственному данной группе. В этой функциональной зависимости величина  $\varphi = v/v_{кр}$  есть приведенный удельный объем, равный обратной величине приведенной плотности.

В табл. 23 приложений даны величины приведенных плотностей (в зависимости от  $\pi$  и  $\tau$ ) для всех четырех групп.

Рассчитать удельный объем  $v'_{250^\circ \text{C}}$  жидкого четыреххлористого углерода  $\text{CCl}_4$  при температуре насыщения  $t_s = 250^\circ \text{C}$ , если известно, что при  $p_s = 1 \text{ кг/см}^2$   $\text{CCl}_4$  имеет температуру насыщения, равную  $77^\circ \text{C}$ , и удельный объем  $v'_1 = 0,001276 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Экспериментальное значение  $(v'_{250^\circ \text{C}})_s = 0,00190 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Критические параметры  $\text{CCl}_4$  следующие:  $p_{кр} = 46,50 \text{ кг/см}^2$ ;  $t_{кр} = 283,2^\circ \text{C}$  и  $v_{кр} = 0,00179 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

### Решение

Находим величину критического коэффициента сжимаемости:

$$z_{кр} = \frac{p_{кр} v_{кр}}{RT_{кр}} = \frac{46,50 \cdot 10^4 \cdot 0,00179 \cdot 154}{848 \cdot 556,4} = 0,272.$$

Как видно,  $\text{CCl}_4$  относится ко второй группе веществ

Находим для  $t_s = 250^\circ \text{C}$ :

$$\tau_{s, 250^\circ \text{C}} = \frac{T_s}{T_{кр}} = \frac{250 + 273}{283 + 273} = 0,940.$$

По табл. 23 приложений находим приведенную плотность  $1/\varphi'_{250^\circ \text{C}} = 1,797$ . Аналогично находим критическую плотность  $1/\varphi'_1$  для  $t_s = 77^\circ \text{C}$ :

$$\tau_{s, 1} = \frac{77 + 273}{283 + 273} = 0,629; \quad \frac{1}{\varphi'_1} = 2,688.$$

Так как удельные объемы прямо пропорциональны приведенным объемам, можно заключить, что искомый удельный объем

$$v'_{250^\circ \text{C}} = v'_1 \frac{\varphi'_{250^\circ \text{C}}}{\varphi'_1} = \frac{0,001276 \cdot 2,688}{1,797} = 0,00191 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Таким образом, ошибка в расчете по сравнению с экспериментальной величиной составляет всего 0,5%.

8-19. Рассчитать, пользуясь таблицами приведенных плотностей (приложения, табл. 23), удельный объем паров этилового спирта  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  при температуре  $200^\circ \text{C}$  и давлении  $150 \text{ кг/см}^2$ , если известно, что при этом же давлении и температуре  $t = 150^\circ \text{C}$  удельный объем  $v = 0,01448 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Значение  $v_{200}$  по экспериментальным данным равно  $0,01622 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Критические параметры этилового спирта следующие:  $p_{кр} = 72,5 \text{ кг/см}^2$ ;  $t_{кр} = 250,8^\circ \text{C}$ ;  $v_{кр} = 0,00363 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Определить погрешность в расчете.

Ответ:  $v_{200} = 0,01652 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $\delta = 1,8\%$ .

8-20. Рассчитать удельный объем жидкого аммиака на линии насыщения при  $t=50^\circ\text{C}$ , пользуясь табл. 23 приложений.

Известно, что при  $p=6,27 \text{ кг/см}^2$  температура насыщения равна  $10^\circ\text{C}$ , а удельный объем  $v'=0,0016 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Сравнить расчетную величину с табличными данными, по которым  $v'=0,00177 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Критические параметры:  $T_{\text{кр}}=405,5^\circ\text{K}$ ;  $v_{\text{кр}}=0,00426 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $p_{\text{кр}}=111,5 \text{ кг/см}^2$ .

Ответ:  $v'_{50^\circ\text{C}}=0,00176 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $\delta=0,6\%$ .

8-21. Определить удельный объем водяного пара при  $p=1 \text{ кг/см}^2$  и  $t=250^\circ\text{C}$ , пользуясь табл. 23 приложений, если известно, что при  $p=1 \text{ кг/см}^2$  и  $t=150^\circ\text{C}$  удельный объем его  $v_{1,150}=1,975 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Сравнить полученное значение с табличной величиной, равной  $2,45 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Ответ:  $v=2,22 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $\delta=9,4\%$ .

8-22. Рассчитать по уравнению Клапейрона-Клаузиуса величину изменения удельного объема ртутного пара при испарении, если давление насыщения  $p_s=0,10 \text{ кг/см}^2$ ;  $r=71,41 \text{ ккал/кг}$ , а зависимость давления насыщения от температуры задана следующей таблицей:

|                        |       |       |       |
|------------------------|-------|-------|-------|
| $p_s, \text{ кг/см}^2$ | 0,08  | 0,10  | 0,12  |
| $t_s, ^\circ\text{C}$  | 241,0 | 249,6 | 256,7 |

Ответ:  $\Delta v=2,07 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

8-23. При помощи уравнения Клапейрона-Клаузиуса определить теплоту парообразования  $r$  водяного пара при  $t_s=210^\circ\text{C}$  и сравнить ее с табличной величиной  $r_{\text{табл}}=1900 \text{ кдж/кг}$ . Производную  $dp_s/dT_s$  найти приближенно методом конечных разностей (см. задачи 8-13–8-15) на основании следующей табличной зависимости давления насыщения от температуры насыщения:

|                                    |       |       |       |       |       |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $t_s, ^\circ\text{C}$              | 208   | 209   | 210   | 211   | 212   |
| $p_s \cdot 10^{-5}, \text{ н/м}^2$ | 18,33 | 18,71 | 19,09 | 19,47 | 19,87 |

Ответ:  $r=1900 \text{ кдж/кг}$ .

8-24. Уравнение состояния для 1 кг идеального ассоциирующего газа<sup>1</sup> имеет следующий вид:

$$pv = RT \left( 1 - \frac{Cp}{5 + 2m} \right).$$

Здесь

$R$  — газовая постоянная, отнесенная к 1 кг;

$m$  — число «потерянных вращений», величина постоянная;

$C$  — также постоянная величина.

Воспользовавшись этим уравнением, вывести выражение для разности теплоемкостей  $C_p - C_v$ .

<sup>1</sup> Идеальный ассоциирующий газ — это такой газ, у которого вандерваальсовское взаимодействие между молекулами приводит только к образованию комплексов молекул в результате их ассоциации. Поэтому в уравнении состояния такого газа отсутствуют поправки на  $a$  и  $b$ . Уравнение выведено М. П. Вукаловичем и И. И. Новиковым в предположении, что при ассоциации образуются только двойные комплексы.

## Решение

Существует известное термодинамическое соотношение

$$c_p - c_v = -T \frac{(\partial v / \partial T)_p^2}{(\partial v / \partial p)_T} = T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p^2 \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_T.$$

Воспользовавшись уравнением состояния, определим необходимые частные производные. Для нахождения  $(\partial v / \partial T)_p$  дифференцируем уравнение состояния по  $T$  при  $p = \text{const}$ :

$$p \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = R + \frac{3+2m}{2} \cdot \frac{CpR}{T^{\frac{5+2m}{2}}}.$$

откуда

$$\left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{R \left( 1 + \frac{3+2m}{2} \cdot \frac{Cp}{T^{\frac{5+2m}{2}}} \right)}{p}.$$

Для определения  $(\partial p / \partial v)_T$  дифференцируем уравнение по  $v$  при  $T = \text{const}$ :

$$v \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_T + p = - \frac{CR}{T^{\frac{3+2m}{2}}} \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_T.$$

Следовательно,

$$\left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_T = \frac{p}{v + \frac{CR}{T^{(3+2m)/2}}}.$$

Подставляем значения производных в уравнение для разности теплоемкостей:

$$c_p - c_v = \frac{TR^2 \left( 1 + \frac{3+2m}{2} \cdot \frac{Cp}{T^{(5+2m)/2}} \right)^2}{p^2} \cdot \frac{p}{v + \frac{CR}{T^{(3+2m)/2}}},$$

или

$$c_p - c_v = \frac{R^2 T \left( 1 + \frac{3+2m}{2} \cdot \frac{Cp}{T^{(5+2m)/2}} \right)^2}{pv + R \frac{Cp}{T^{(3+2m)/2}}}.$$



Из исходного уравнения состояния следует, что

$$pv = RT - \frac{CpR}{T^{(3+2m)/2}},$$

значит,

$$c_p - c_v = \frac{R^2 T \left( 1 + \frac{3+2m}{2} \cdot \frac{Cp}{T^{(5+2m)/2}} \right)^2}{RT}$$

или окончательно

$$c_p - c_v = R \left( 1 + \frac{3+2m}{2} \cdot \frac{Cp}{T^{(5+2m)/2}} \right)^2.$$

8-25. Воспользовавшись уравнением состояния, приведенным в предыдущей задаче, получить в общем виде выражение для теплоемкости  $c_v$  идеального ассоциирующего газа.

Указания 1) Использовать дифференциальное уравнение  $(\partial c_v / \partial v)_T = T (\partial^2 p / \partial T^2)_v$ .

2) В уравнении

$$pv = RT \left( 1 - \frac{Cp}{T^{(5+2m)/2}} \right)$$

член  $Cp/T^{(5+2m)/2}$  мал; поэтому без особой погрешности давление  $p$  можно выразить из уравнения Клапейрона в виде  $p = RT/v$ . Тогда уравнение состояния примет вид:

$$pv = RT \left( 1 - \frac{CR}{vT^{(3+2m)/2}} \right).$$

Это уравнение и следует использовать для нахождения производных.

$$\text{Ответ: } c_v = c_{v,\infty}(T) + \frac{1+2m}{2} \cdot \frac{3+2m}{2} \cdot \frac{CpR}{T^{(5+2m)/2}}.$$

8-26. Пользуясь уравнением состояния идеального ассоциирующего газа

$$pv = RT \left( 1 - \frac{Cp}{T^{(5+2m)/2}} \right)$$

и дифференциальным уравнением

$$\left( \frac{\partial c_p}{\partial p} \right)_T = -T \left( \frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_p,$$

вывести формулу для расчета теплоемкости  $c_p$ . По этой формуле рассчитать теплоемкость  $c_p$  перегретого водяного пара при  $p = 1 \text{ кг/см}^2$  и температурах:

$T_s$ , 400, 600, 800 и  $1000^\circ \text{K}$ , а также при  $p = 30 \text{ кг/см}^2$  и температурах  $T_s$ , 600, 800 и  $1000^\circ \text{K}$ . Построить в масштабе график  $c_p = f(T)$  при  $p = \text{const}$  по табличным данным и нанести на него рас-

считанные точки. Определить погрешности рассчитанных величин в процентах и объяснить причину этих погрешностей.

Ответ:

$$c_p - c_{p,0}(T) + \frac{5+2m}{2} \cdot \frac{3+2m}{2} \cdot \frac{CRp}{T^{(5+2m)/2}}$$

Результаты расчета

| Величины | Температура $T$ , °K |     |     |     |      |
|----------|----------------------|-----|-----|-----|------|
|          | $T_0$                | 400 | 600 | 800 | 1000 |

$$p = 1 \text{ кг/см}^2$$

|                                     |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $c_p$ , ккал/кг·град                | 0,474 | 0,471 | 0,485 | 0,514 | 0,548 |
| $c_{p, \text{табл}}$ , ккал/кг·град | 0,498 | 0,480 | 0,482 | 0,514 | 0,546 |
| $\delta$ , %                        | -4,8  | -1,9  | +0,6  | 0     | +0,4  |

$$p = 30 \text{ кг/см}^2$$

|                                     |       |   |       |       |       |
|-------------------------------------|-------|---|-------|-------|-------|
| $c_p$ , ккал/кг·град                | 0,639 | — | 0,574 | 0,536 | 0,556 |
| $c_{p, \text{табл}}$ , ккал/кг·град | 0,856 | — | 0,574 | 0,538 | 0,557 |
| $\delta$ , %                        | 25,4  | — | 0,0   | -0,5  | -0,2  |

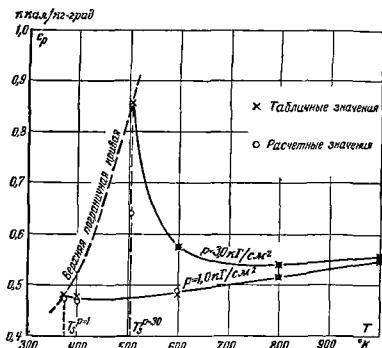


Рис. 8-3. К задаче 8-26.

При температурах 600°K и более высоких расхождения весьма малы. Вблизи от пограничной кривой они значительны и на самой пограничной линии оказываются максимальными (рис. 8-3). Это обстоятельство объясняется главным образом тем, что исходное

уравнение состояния учитывает объединение молекул только в двойные комплексы, тогда как в действительности при состоянии перегретого пара, близком к насыщению, эти комплексы могут содержать и значительно большее число молекул. Поэтому на разрушение этих комплексов затрачивается большая энергия.

## 9. СВОЙСТВА ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА; ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО СОСТОЯНИЯ<sup>1</sup>

9-1. Состояние  $H_2O$  определяются параметрами.

- а)  $p = 60 \text{ кг/см}^2$ ;  $t = 320^\circ \text{C}$ ,
- б)  $p = 4 \text{ кг/см}^2$ ,  $v = 0,015 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;
- в)  $t = 170^\circ \text{C}$ ;  $v = 0,00105 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;
- г)  $p = 182 \text{ кг/см}^2$ ;  $t = 356,26^\circ \text{C}$ .

Каковы качественно эти состояния (жидкость, кипящая жидкость, влажный пар, сухой насыщенный пар, перегретый пар)?

Ответ: а) перегретый пар, б) влажный пар, в) жидкость; г) состояние неопределенно. кипящая жидкость, влажный пар с любой степенью сухости или сухой насыщенный пар.

9-2. Состояние водяного пара задано следующими параметрами: давление  $p = 85 \text{ кг/см}^2$  и плотность  $\rho = 0,120 \text{ г/см}^3$ .

Определить температуру  $t$ , внутреннюю энергию  $u$ , энтальпию  $i$  и энтропию  $s$  1 кг пара

Ответ:  $t = 297,86^\circ \text{C}$ ;  $u = 1732 \text{ кДж/кг}$ ;  
 $i = 1802 \text{ кДж/кг}$ ;  $s = 4,055 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ \text{K}$ .

9-3. В сосуде объемом  $V = 0,035 \text{ м}^3$  содержится 0,1 кг водяного пара при давлении  $p = 6 \text{ кг/см}^2$ .

Определить величину внутренней энергии пара.

Ответ:  $U = 262 \text{ кДж}$ .

9-4. По трубе течет водяной пар при  $p = 20 \text{ кг/см}^2$  и  $x = 0,96$  со скоростью  $w = 40 \text{ м/сек}$ . Расход пара  $m = 5000 \text{ кг/ч}$ .

Определить внутренний диаметр трубы.

Ответ:  $d = 66 \text{ мм}$ .

9-5. В сосуде объемом  $V = 500 \text{ см}^3$  находится в равновесии смесь сухого насыщенного пара и кипящей воды общей массой  $m = 0,05 \text{ кг}$ . Температура внутри сосуда  $t = 310^\circ \text{C}$ .

Найти степень сухости смеси.

Ответ:  $x = 50,7\%$ .

9-6. В барабане котельного агрегата находится кипящая вода и над ней — водяной пар под давлением  $p = 92 \text{ кг/см}^2$ . Масса воды  $m_v = 5000 \text{ кг}$ . Объем барабана  $V = 8 \text{ м}^3$ .

Какова масса пара, находящегося над зеркалом испарения если пар считать сухим насыщенным?

Ответ:  $m_{\text{п}} = 44,6 \text{ кг}$

<sup>1</sup> При решении задач авторы пользовались таблицами термодинамических свойств воды и водяного пара [Л. 4]

9-7. Определить среднюю теплоемкость  $c_{\text{ит}}$  водяного пара при  $v=0,07 \text{ м}^3/\text{кг}$  в интервале температур от  $t_1=380^\circ\text{C}$  до  $t_2=610^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $c_{vm} \Big|_{t_1}^{t_2} = 1,771 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$

9-8. Определить среднюю теплоемкость  $c_{pm}$  водяного пара при  $p=50 \text{ кГ/см}^2$  в интервале температур от 400 до 650°С

Ответ:  $c_{\text{пр}} \Big|_{t_2}^{t_1} \approx 2,353 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$

9-9. Известно, что при переходе через пограничную кривую теплоемкость  $c_v$  вещества меняется скачком. Определить величину скачка теплоемкости водяного пара  $c_v^{дф} - c_v^{эф}$  при переходе через пограничную кривую на изохоре  $v = 0,006 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

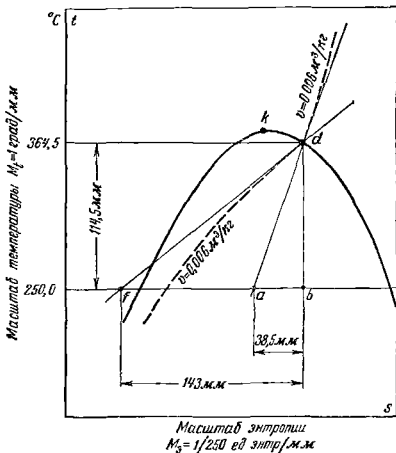


Рис. 9-1. К задаче 9 9.

$c_v^{дф}$  — теплоемкость  $c_v$  на пограничной кривой при подходе со стороны двухфазного состояния;  $c_v^{одф}$  — то же со стороны однофазного состояния. Задачу решить при помощи  $Ts$ -диаграммы (рис. 9-1).

Указание: использовать соотношение  $c_p = T \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_v$ .

Ответ:  $c_v^{\text{эф}} - c_v^{\text{сф}} = 13,44 - 3,60 = 9,84 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$ .

9-10. Определить объем резервуара, заполненного влажным паром, имеющим степень сухости  $x=0,65$ , если масса пара  $m=160 \text{ кг}$ , а температура в резервуаре  $t=280^\circ \text{C}$ .

Ответ:  $V=3,21 \text{ м}^3$ .

9-11. Вакууметр, установленный на конденсаторе паровой турбины, показывает разрежение  $p_{\text{вак}}=720 \text{ мм рт. ст.}$ , а ртутный барометр, находящийся в машинном зале,— давление  $B=998 \text{ ммбар}$ .

Определить объем поступающего в конденсатор пара (имеющего степень сухости  $x=0,872$ ) в течение 1 сек, если часовой расход пара, проходящего через установку, равен  $D=540 \text{ т/ч}$ . Во сколько раз объем пара превышает объем конденсата?

Ответ:  $V_n=4713 \text{ м}^3/\text{сек}$ ;  $v_n/v_k=31298$ .

9-12. Найти в общем виде разность между значениями энтальпии жидкости на нижней пограничной кривой  $i'=i'(p)$  и теплом  $q'_p$ , которое нужно подвести к 1 кг воды, чтобы нагреть ее при постоянном давлении  $p$  от температуры в тройной точке  $t_{\text{тр}}$  до температуры насыщения  $t_s$ .

Вычислить величины этой разности для  $p=20$  и  $200 \text{ кг/см}^2$ . Определить, какую долю в процентах составляет искомая разность от величины  $i'$ .

#### Решение

Полный дифференциал энтальпии  $i$  равен:

$$di = c_p dt + \left( \frac{\partial i}{\partial p} \right)_T dp.$$

следовательно,

$$i - i_0 = \int_{t_0}^t c_p dt + \int_{p_0}^p \left( \frac{\partial i}{\partial p} \right)_T dp.$$

В этом выражении  $i_0=0$ , если точка начала отсчета энтальпии взята при параметрах  $p_0$  и  $t_0$ . Для воды эти параметры приняты равными  $p_0=p_{\text{тр}}$  и  $t_0=t_{\text{тр}}$ , т. е. равными параметрам в тройной точке. Следовательно, энтальпия  $i'$  равна:

$$i' = \int_{t_{\text{тр}}}^{t_s} c_p dt + \int_{p_{\text{тр}}}^{p=p_s} \left( \frac{\partial i}{\partial p} \right)_{T=T_{\text{тр}}} dp.$$

Первый интеграл представляет собой величину  $q'_p$ . Следовательно, искомая разность равна:

$$i' - q'_p = \int_{p_{\text{тр}}}^p \left( \frac{\partial i}{\partial p} \right)_{T=T_{\text{тр}}} dp.$$

Рассматривая выражение для полного дифференциала, мы видим, что последний интеграл равен величине энтальпии жидкости при температуре  $t=t_{\text{тр}}$  и давлении  $p$  (рис. 9-2), т. е.

$$\int_{p_{\text{тр}}}^p \left( \frac{di}{dp} \right)_{t=t_{\text{тр}}} dp = i(p, t_{\text{тр}}).$$

Допуская очень малую ошибку, можно принять, что  $t_{\text{тр}} = 0,01^\circ \text{C} \approx 0^\circ \text{C}$ . Тогда искомая в задаче разность находится прямо из таблиц при  $t=0^\circ \text{C}$  и различных давлениях.

По таблицам находим: при  $p=20 \text{ кг/см}^2$  величина  $i' - q'_p = 0,5 \text{ ккал/кг}$ , что составляет от  $i' = 215,9 \text{ ккал/кг}$  всего лишь  $0,2\%$ . При  $p=200 \text{ кг/см}^2$  искомая разность равна  $4,7 \text{ ккал/кг}$ , т. е.  $1,1\%$  от величины  $i' = 431,3 \text{ ккал/кг}$ .

Таким образом, при невысоких давлениях можно считать приближенно, что  $i' \approx q'_p$ .

9-13. Пользуясь таблицами, определить величины разности между энтальпией  $i'$  и внутренней энергией  $u'$  на нижней пограничной кривой при давлениях  $p=20$  и  $200 \text{ кг/см}^2$ .

Какой процент составляет эта разность от величины  $i'$ ?

Ответ: при  $20 \text{ кг/см}^2$   $i' - u' = 0,55 \text{ ккал/кг}$ , или  $0,25\%$  от  $i'$ ; при  $200 \text{ кг/см}^2$   $i' - u' = 9,31 \text{ ккал/кг}$ , т. е.  $2,16\%$  от  $i'$ .

9-14. На сколько отличаются величины энтальпии перегретого пара  $i_{\text{пе}} = i_{\text{в}}(p, t_{\text{пе}})$  от величин  $q_p = i_{\text{пе}} - i(p, t_{\text{тр}})$  при давлении  $p=20 \text{ кг/см}^2$  и температуре  $t_{\text{пе}}=500^\circ \text{C}$ , а также при  $p=200 \text{ кг/см}^2$  и той же температуре?

Ответ:  $\delta_1=0,06\%$ ;  $\delta_2=0,61\%$ . На рис. 9-2  $q_p = i_4 - i_1$ .

9-15. При помощи  $i$ - $s$ -диаграммы определить теплоту парообразования  $r$  при абсолютном давлении  $p=20 \text{ кг/см}^2$ . Сравнить результат с табличным значением.

Указание: На изобаре  $p=20 \text{ кг/см}^2$  выбрать точку, отвечающую некоторой произвольной степени сухости  $x$  (рис. 9-3, точка A).

Для этого состояния выразить энтальпию влажного пара  $i_x$  через  $g$  и  $i''$ . Значения  $i_x$  и  $i''$  определить по  $i$ - $s$ -диаграмме.

9-16. Хорошо известен следующий опыт: на брусок льда положена проволока, к концам которой привешены два тяжелых груза (рис. 9-4). Через некоторое время проволока проходит сквозь брусок, который, тем не менее, остается цельным.

Объяснить это явление. Определить температуру в точках соприкосновения проволоки со льдом, если эта проволока имеет квадратное ( $1 \times 1 \text{ мм}$ ) сечение, ширина поверхности бруска равна  $100 \text{ мм}$ , масса каждого груза  $m=250 \text{ кг}$ , а температура воздуха в помещении  $t=0^\circ \text{C}$ . Теплота плавления льда при  $t=0^\circ \text{C}$  равна

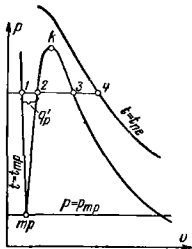


Рис. 9-2. К задаче 9-12.

«тр» —  $i=0$ ; 1 —  $i=i(p, t_{\text{тр}})$ ; 2 —  $i=i''(p)$ ; 3 —  $i=i'(p)$ ; 4 —  $i=i(p, t_{\text{пе}})$ .

$v = 334 \text{ кДж/кг}$ , удельные объемы воды и льда на кривых фазовых переходов вода — лед при  $t = 0^\circ \text{C}$  равны  $v_v = 0,9999 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$  и  $v_d = 1,0907 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Указание: применить уравнение Клапейрона Клаузууса, заменив производную отношением конечных приращений давления и температуры.

Ответ:  $t = -3,6^\circ \text{C}$ .

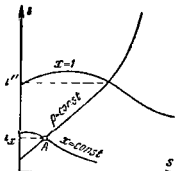


Рис. 9-3. К задаче 9-15.

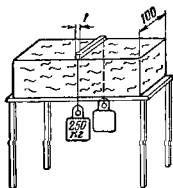


Рис. 9-4. К задаче 9-16.

9-17. Из опыта получена зависимость  $p_s = f(t_s)$  между давлением и температурой насыщения водяного пара, которая описывается кривой (рис 9-5). Найти графоаналитическим методом величину теплоты парообразования  $r$  при  $p_s = 0,6 \text{ кг/см}^2$ . Сравнить полученное значение  $r$  с табличным.

**Решение**

Из уравнения Клапейрона-Клаузууса следует, что

$$r = \frac{dp_s}{dt_s} T_s (v'' - v').$$

Величину  $dp_s/dt_s$  находим графически, построив касательную к кривой  $p_s = f(t_s)$  в точке, для которой давление  $p_s = 0,6 \text{ кг/см}^2$ .

Очевидно, что

$$\begin{aligned} \frac{dp_s}{dt_s} = \tan \alpha &= \frac{\text{отрезок } AB}{\text{отрезок } CB} = \\ &= \frac{0,6 \cdot 10^4}{25} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{град}. \end{aligned}$$

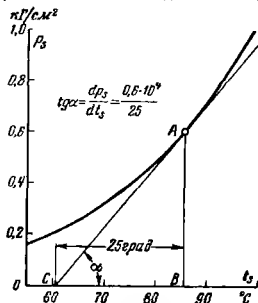


Рис 9-5. К задаче 9-17

По графику определяем значение температуры  $T_s = 86 + 273 = 359^\circ \text{K}$ . Значение  $v''$  подсчитываем приближенно по уравнению Клапейрона (ошибка при этом для такого малого давления составляет примерно 1,5%):

$$v'' \approx \frac{848 \cdot 359}{18 \cdot 0,6 \cdot 10^4} = 2,82 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Значением  $v'$  можно пренебречь, так как удельный объем воды приблизительно равен  $0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$ , а эта величина составляет всего лишь 2,5% от величины погрешности определения  $v''$ .

Таким образом,

$$r = \frac{0,6 \cdot 10^3 \cdot 359 \cdot 2,82}{427,25} = 568 \text{ ккал/кг}.$$

По таблицам при  $p = 0,6 \text{ кг/см}^2$   $r = 548,0 \text{ ккал/кг}$ . Следовательно, ошибка в определении  $r$  оказалась равной  $\delta = \frac{(568 - 548)}{548} = 3,6\%$ .

9-18. Какова величина перегрева воды  $\Delta t_n$ , окружающей пузырек пара, образовавшегося на нагреваемой стенке сосуда, если дав-

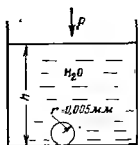


Рис 9-6. К задаче 9-18.

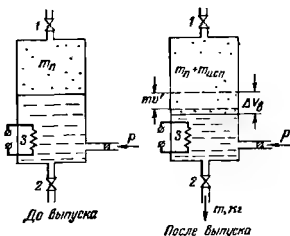


Рис 9-7. К задачам 9-19, 9-21.

ление на свободную поверхность воды равно  $p = 1 \text{ кг/см}^2$ , высота уровня равна  $h = 300 \text{ мм}$  и радиус кривизны пузырька  $r = 0,005 \text{ мм}$  (рис. 9-6)? Коэффициент поверхностного натяжения на границах поверхностей вода пар в пузырьке можно подсчитать по эмпирической формуле Бачинского [Л 17]:

$$\sigma = 0,0071 \left( \frac{p' - p''}{1000} \right)^{0,4}, \text{ кг/м},$$

в которой  $p'$  и  $p''$ ,  $\text{кг/м}^2$  — соответственно плотности жидкостей и сухого насыщенного пара.

Ответ:  $\Delta t_n = 6 \text{ град}$ .

9-19. Для исследования термодинамических свойств веществ на линии насыщения применяется калориметр, устроенный по следующему принципу (рис. 9-7).

Адиабатически изолированный сосуд, в котором в равновесии находятся кипящая жидкость и над ней сухой насыщенный пар, снабжен пароотводной трубкой с вентилем 1 и водоотводной трубкой с вентилем 2.

Открывая нужные вентили, можно выпускать из сосуда либо пар, либо воду, либо то и другое одновременно. Давление  $p = p_n$



в сосуде поддерживается все время строго постоянным. Для сохранения равновесного состояния к системе подводят энергию в виде тепла. Эта энергия, сообщаемая нагревателем 3, расходуется на испарение некоторого количества жидкости.

Какова мощность  $N$  на клеммах нагревателя, установленного в калориметре, если исследуемое вещество — вода и если при закрытом вентиле 1 из калориметра за время  $\tau = 10$  мин удаляется  $m = 0,8$  кг жидкой кипящей воды?

Абсолютное давление в калориметре  $p = 20$  кг/см<sup>2</sup>.

### Решение

Введем некоторые дополнительные обозначения:

$m_n$  — количество сухого насыщенного пара до выпуска, кг;

$m_v$  — количество кипящей воды до выпуска, кг;

$m_{исп}$  — количество испаренной за  $\tau$ , мин, воды, кг;

$V_{исп}$  — объем этой воды, м<sup>3</sup>;

$\Delta m_v$  — уменьшение первоначальной массы воды за счет выпуска и испарения, кг;

$\Delta V_v$  — объем, соответствующий этому уменьшению, м<sup>3</sup>.

Составим уравнение материального баланса вещества в калориметре.

$$m_v + m_n = m_v - \Delta m_v + m_n + m_{исп} + m$$

или

$$\Delta m_v = m_{исп} + m,$$

но  $\Delta m_v = \Delta V_v / v'$ , а в свою очередь  $\Delta V_v = m_{исп} v''$ .

Следовательно,  $\Delta m_v = m_{исп} \cdot v'' / v'$ . Уравнение баланса примет вид:

$$m_{исп} \frac{v''}{v'} = m_{исп} + m.$$

Находим из этого уравнения величину  $m_{исп}$ :

$$m_{исп} = \frac{m}{\frac{v''}{v'} - 1} = m \frac{v'}{v'' - v'}.$$

Величина  $v'' / (v'' - v')$  в последнем уравнении определяет то количество килограммов воды, которое в целях сохранения равновесного состояния нужно испарить, если из калориметра удалять 1 кг H<sub>2</sub>O в виде кипящей жидкости.

Энергия, потребляемая для этого, будет равна.

$$\beta = r \frac{v'}{v'' - v'}, \text{ дж/кг,}$$

где  $r$ , дж/кг — теплота парообразования при  $p_0 = p$ .

Искомая мощность нагревателя

$$N = \frac{\beta m}{60\tau}, \text{ вт.}$$

Находим из таблицы величины  $v'$ ,  $v''$  и  $r$  при  $p_s = 20 \text{ кГ/см}^2$ :  
 $v' = 0,0011749 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v'' = 0,1015 \text{ м}^3/\text{кг}$  и  $r = 452,6 \text{ ккал/кг}$ . Подставляя их в выражение для мощности и учитывая, что  $1 \text{ ккал} = 10^3 \times 4,1868 \text{ Дж}$ , получаем:

$$N = \frac{0,8 \cdot 452,6 \cdot 4,1868 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,0011749}{0,1015 - 0,0012}}{10 \cdot 60} = 29,6 \text{ вт.}$$

9-20. Из калориметра, описанного в задаче 9-19 (рис 9-8), при закрытом вентиле 2 удаляется 1 кг сухого насыщенного пара.

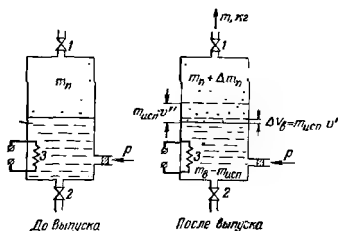


Рис. 9-8. К задачам 9-20, 9-21.

Какое количество  $m_{\text{исп}}$ , кг, воды нужно испарить с помощью нагревателя, чтобы в калориметре при неизменном давлении  $p = 20 \text{ кГ/см}^2$  сохранилось равновесие?

Какова потребная мощность нагревателя, если при тех же условиях удаляется  $m = 0,8 \text{ кг}$  пара в течение  $\tau = 10 \text{ мин}$ ?

Ответ:

$$m_{\text{исп}} = 1 \cdot \frac{v''}{v'' - v'} = 1,012 \text{ кг};$$

$$N = \gamma \frac{m}{60\tau} = 2,56 \text{ кВт, где } \gamma = r \frac{v''}{v'' - v'}.$$

Величина  $\gamma$  определяет ту энергию, которую необходимо подвести, чтобы сохранить равновесие в калориметре, если из него удаляется 1 кг  $\text{H}_2\text{O}$  в виде сухого насыщенного пара.

9-21. Для определения теплоты парообразования воды были проведены два опыта с калориметром, описанным в задаче 9-19. В первом из них при постоянно поддерживаемом равновесном состоянии выпускалась вода и после охлаждения взвешивалась. Во втором — выпускался сухой насыщенный пар, и конденсат его также взвешивался. Измерялось время опыта, давление в калориметре

и мощность на клеммах нагревателя. Средние величины, полученные из опыта, приведены ниже:

| Наименование опыта                                | Абсолютное давление, $p$ , $\text{кг/см}^2$ | Время опыта $t$ , мин | Количество выпущенного вещества $m$ , г | Падение напряжения на клеммах нагревателя $\Delta U$ , в | Сила тока, протекавшего через нагреватель, $I$ , а |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Опыт с выпуском кипящей воды                      | 60,0                                        | 15                    | 785                                     | 9,18                                                     | 6,2                                                |
| Опыт с выпуском сухого насыщенного пара . . . . . | 60,0                                        | 16                    | 360                                     | 90,75                                                    | 6,8                                                |

На основании опытных данных определить величину теплоты парообразования.

Ответ:  $r = \gamma - \beta = 1580 \text{ кдж/кг} = 377 \text{ ккал/кг}$ .

9-22. Какое количество тепла  $q_n$ , кдж/кг, нужно отвести от 1 кг водяного пара, имеющего параметры  $p_1 = 110 \text{ кг/см}^2$  и  $x_1 = 0,90$ , если при постоянном объеме его паросодержание уменьшается до  $x_2 = 0,10$ ?

Задачу решить, не прибегая к  $Ts$  диаграмме.

Ответ:  $q_n = -1415 \text{ кдж/кг}$

9-23. Водяной пар охлаждается в закрытом сосуде и изменяет свое состояние от  $p_1$  и  $t_1$  до комнатной температуры  $t = 20^\circ \text{C}$ .

Каково будет конечное состояние вещества, если а)  $p_1 = 100 \text{ кг/см}^2$ ;  $t_1 = 600^\circ \text{C}$ ; б)  $p_1 = 300 \text{ кг/см}^2$ ,  $t_1 = 520^\circ \text{C}$ ?

Ответ: В обоих случаях образуется влажный пар.  $p_a^{\text{кон}} = p_b^{\text{кон}} = p_s, t = 20^\circ \text{C} = 0,02383 \text{ кг/см}^2$ ;  $x_a = 0,066\%$ ;  $x_b = 0,015\%$ .

9-24. В начале растопки парового котла состояние пароводяной смеси определится параметрами  $p_1 = 20 \text{ кг/см}^2$  и  $x_1 = 0,02$ .

За какое время при закрытых вентилях на линии питательной воды и на паровой магистрали давление пара в котле возрастет до  $p_2 = 50 \text{ кг/см}^2$ , если топочные газы отдают рабочему телу  $Q = 4000 \text{ ккал/мин}$  тепла, а масса пароводяной смеси  $m = 10^4 \text{ кг}$ ?

Ответ: За 2 ч 45 мин.

9-25. В толстостенный стальной сосуд, из которого был предварительно удален воздух, поместили некоторое количество воды, а затем подвергли ее нагреванию и исследовали опытным путем зависимость давления в сосуде от температуры. В результате опыта была получена зависимость  $p = f(t)$ , которая представлена на рис. 9-9.

Используя этот график и таблицы свойств воды и водяного пара, определить массу помещенной в сосуд воды, если объем сосуда составлял  $300 \text{ см}^3$ .

Ответ:  $m = 212 \text{ г}$ .

9-26. В пароперегреватель котельного агрегата поступает водяной пар в количестве  $16 \text{ т/ч}$ . Определить сообщаемое паре часовое количество тепла  $Q$ , необходимое для перегрева пара до  $t_{\text{пе}} = 560^\circ \text{C}$ , если степень сухости пара перед входом в пароперегре-

ватель  $x_1=0,98$ , а абсолютное давление пара в пароперегревателе  $p=130 \text{ кг/см}^2$ .

Выразить  $Q$  в  $\text{ккал/ч}$  и в  $\text{Мвт}$ . Изобразить процесс в  $Ts$ - и  $is$ -диаграммах. Задачу решать, пользуясь таблицами.

Ответ:  $Q=3\,133 \cdot 10^3 \text{ ккал/ч}=3,46 \text{ Мвт}$  (рис. 9-10).

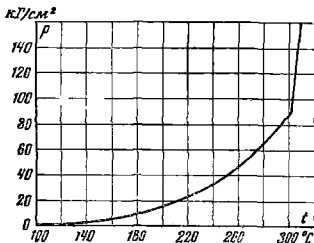


Рис 9-9. К задаче 9-25

9-27. К питательной воде, вводимой в прямоточный котел при давлении  $p_1=240 \text{ кг/см}^2$  и температуре  $t_1=350^\circ\text{C}$  в количестве  $D=900 \cdot 10^3 \text{ кг/ч}$ , подводится от топочных газов  $Q=1\,609 \text{ Гдж/ч}$  тепла.

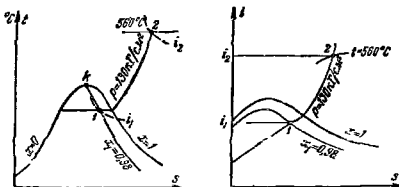


Рис. 9-10. К задаче 9-26.

Определить температуру пара на выходе из котла, его энтальпию и внутреннюю энергию. Падением давления при протекании воды и пара по трубам котла пренебречь.

Представить процесс в  $Ts$ -,  $is$ - и  $pv$  диаграммах

Ответ:  $t_2=570^\circ\text{C}$ ;  $i_2=3\,414 \text{ кдж/кг}$ ;  $u_2=3\,079 \text{ кдж/кг}$ .

9-28. Питательная вода при давлении  $p=140 \text{ кг/см}^2$  и при температуре  $t=300^\circ\text{C}$  поступает в котельный агрегат, где превращается в перегретый пар с температурой  $t=570^\circ\text{C}$ . Подсчитать среднюю

интегральную температуру в процессе изменения состояния воды, пренебрегая потерями давления.

У к а з а н и е. Средняя интегральная температура тела в процессе подвода тепла к нему равна:

$$T_{cp} = \frac{\int_1^2 dq}{s_2 - s_1}.$$

Так как по условию  $p = \text{const}$ , можно записать, что  $dq_p = dl$ . Следовательно,

$$T_{cp} = \frac{i_2 - i_1}{s_2 - s_1}.$$

На рис 9-11 изображен рассматриваемый процесс 1-2 и показана изотерма  $T = T_{cp}$ . Очевидно, что на этом чертеже пл  $12s_2s_1 = \text{пл. } 34s_2s_1$ .

Ответ:  $t_{cp} = 365^\circ \text{C}$ .

9-29. Теплоэлектроцентр (ТЭЦ) отдает на производственные нужды заводу  $D_{np} = 20\,000 \text{ кг/ч}$  пара при  $p = 7,0 \text{ кг/см}^2$  и  $x = 0,95$

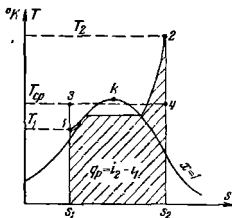


Рис. 9-11. К задаче 9-28

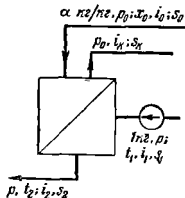


Рис. 9-12 К задаче 9-31.

Завод возвращает конденсат в количестве 60% от  $D_{np}$  при  $t_{возв} = 70^\circ \text{C}$ . Потеря конденсата покрывается химически очищенной водой, имеющей температуру  $t = 90^\circ \text{C}$ .

Сколько килограммов топлива в час нужно было бы сжечь в топке котла, работающего с к. п. д.  $\eta_{ку} = 0,80$ , если бы этот котел специально вырабатывал пар, нужный заводу, и если теплота сгорания топлива  $Q_H^p = 30\,000 \text{ кДж/кг}$ ?

Ответ:  $B = 1,94 \text{ т/ч}$ .

9-30. В целях регулирования температуры перегретого пара в смеситель впрыскивается холодная вода. Какое количество воды на 1 кг пара следует подать в смеситель, если через него проходит перегретый пар с давлением  $p = 30 \text{ кг/см}^2$  и температурой  $t_1 = 480^\circ \text{C}$ , которую нужно снизить до  $t_2 = 460^\circ \text{C}$ ?

Вода на входе имеет давление такое же, как и давление пара, а температура ее  $t_b = 20^\circ \text{C}$ .

Ответ: 0,0138 кг/кг пара.

9-31. В поверхностном подогревателе (рис 9-12) производится регенеративный подогрев питательной воды греющим паром, отобраным из турбины при  $p_0 = 6,6 \text{ кг/см}^2$  и степени сухости  $x_0 = 0,94$ . Конденсат выходит с температурой на  $\Delta t = 2,0^\circ \text{C}$ , меньшей, чем температура насыщения при  $p_0$ . Питательная вода, подаваемая насосом при  $p = 100 \text{ кг/см}^2$ , имеет на входе  $t_1 = 110^\circ \text{C}$  и на выходе  $t_2 = 155^\circ \text{C}$ .

Определить количество пара  $\alpha$ , кг/кг, необходимое для подогрева 1 кг питательной воды.

Найти увеличение энтропии системы, происходящее из-за необратимости процесса теплообмена. Потери на трение пренебречь.

Ответ:  $\alpha = 0,0974 \text{ кг/кг}$ ;  $\Delta s_c = 0,0074 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ \text{K}$ .

9-32. Водяной пар, находящийся в состоянии при  $p_1 = 64 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1 = 410^\circ \text{C}$ , изэнтропически расширяется до тех пор, пока его температура не оказывается равной  $t_2 = 200^\circ \text{C}$ .

Определить средний показатель  $k$  для этого процесса, если он условно описывается уравнением  $pv^k = \text{const}$ .

### Решение

Так как водяной пар не подчиняется уравнению  $pv = RT$ , показатель  $k \neq c_p/c_v$  и поэтому в уравнении  $pv^k = \text{const}$  величина  $k$  является лишь некоторым условным показателем степени, меняющимся на протяжении процесса.

Среднее значение  $k$  можно вычислить, зная начальные и конечные параметры, из соотношения

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k,$$

откуда

$$k = \frac{\lg(p_1/p_2)}{\lg(v_2/v_1)}.$$

Для того чтобы определить параметры  $p_2$  и  $v_2$ , необходимо сначала найти энтропию  $s_1 = s_2 = 1,5898 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ \text{K}$ . Так как  $s_2 > s''_{p=64} = 1,4016 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ \text{K}$ , пар в точке 2 является перегретым. Из таблиц перегретого пара видно, что при температуре  $t_2 = 200^\circ \text{C}$  значение энтропии  $s_2 = 1,5898$  соответствует давлению  $p_2$ , лежащему между  $p = 10,5$  и  $11,0 \text{ кг/см}^2$ . Линейно интерполируя, находим, что  $p_2 = 10,88$  и  $v_2 = 0,1923 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Следовательно,

$$k = \frac{\lg(64/10,88)}{\lg(0,1923/0,04882)} = 1,233.$$

Здесь  $0,04882 = v_1, \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Значительно проще, но менее точно находятся параметры, нужные для вычисления  $k$ , по  $i$ - $s$ -диаграмме.

9-33. Сухой насыщенный пар при  $p_1 = 15 \text{ кг/см}^2$  расширяется по обратимой адиабате до тех пор, пока его удельный объем  $v_2$  не становится равным  $0,50 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Пользуясь  $is$ -диаграммой, определить средний показатель  $k$  влажного пара для этого процесса. Указать метод аналитического (с помощью таблиц) решения этой задачи.

Ответ:  $k=1,127$ . Для аналитического расчета необходимо совместно решить два уравнения.

$$s''_{p=15} = s_2 - s'_2 + (s''_2 - s'_2) x_2;$$

$$v_2 - v'_2 + (v''_2 - v'_2) x_2.$$

Давление  $p_2$ , которому соответствуют значения  $v'_2$ ,  $v''_2$ ,  $s'_2$  и  $s''_2$ , обращающие оба уравнения в тождества (эти величины объемов и энтропий берутся из таблицы кипящей воды и сухого насыщенного пара при  $p_2$ ), находится методом последовательного приближения.

9-34. Полезная внешняя работа тела при изменении его состояния равна  $L_{\text{пол}} = - \int_{P_1}^{P_2} v dp$ . При изэнтропическом расширении этот интеграл равен „теплорезервуару“, т. е. разности энтальпий  $i_1 - i_2$ .

Определить теоретическую мощность турбины, если часовой расход пара  $D$ , протекающего через нее, составляет 640 т/ч. На входе в турбину пар имеет параметры  $p_1 = 130 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1 = 565^\circ \text{C}$ . Давление в конденсаторе турбинной установки  $p_2 = 0,04 \text{ кг/см}^2$ . Процесс расширения пара в турбине считать обратимым, т. е. изэнтропическим. Задачу решить, пользуясь только таблицами.

### Решение

Полная внешняя работа в единицу времени, т. е. искомая мощность, составляет

$$N = D(i_1 - i_2).$$

Задача, таким образом, сводится к нахождению табличных значений энтальпий пара в начальном и конечном состоянии. Энтальпия  $i_1$  находится непосредственно по заданным начальным параметрам. Для определения  $i_2$  воспользуемся условием изэнтропичности процесса, которое определяется равенством

$$s_1 = s_2.$$

Находим нужные нам начальные величины  $i_1 = 838,3 \text{ ккал/кг}$  и  $s_1 = 1,5919 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{K}$ .

Энтропия сухого насыщенного пара при  $p_2 = 0,04 \text{ кг/см}^2$  равна  $s''_2 = 2,0255$ , а энтропия кипящей жидкости  $s'_2 = 0,0998 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{K}$ . Сопоставляя эти три значения энтропий, заключаем, что в конечном состоянии пар оказывается влажным.

Определяем степень сухости  $x_2$ :

$$x_2 = \frac{s_1 - s'_2}{s''_2 - s'_2} = \frac{s_1 - s'_2}{s''_2 - s'_2} = \frac{1,5919 - 0,0998}{2,0255 - 0,0998} = 0,775.$$

Теперь легко найти энтальпию  $i_2$  в конечном состоянии:

$$i_2 = i'_2 + r_2 x_2.$$

Из таблиц находим (при  $p_2=0,04 \text{ кг/см}^2$ ),  $i'_2=28,67$  и  $r_2=581,1 \text{ ккал/кг}$

Следовательно,

$$i_2 = 28,67 + 581,1 \cdot 0,775 = 479,0 \text{ ккал/кг.}$$

Вычисляем, наконец, искомую мощность в кВт, учитывая, что  $1 \text{ ккал} = 4,1868 \text{ кДж}$ :

$$N = 4,1868 \cdot 640 \cdot 10^3 (838,3 - 479,0) \cdot \frac{1}{3600} = \\ = 267 \cdot 10^3 \text{ кВт} = 267 \text{ Мвт.}$$

9-35. В результате прожога стенки барабанного котла произошел взрыв. Барабан имел объем  $V=8,5 \text{ м}^3$ , 0,6 объема было заполнено водой, а остальная часть — сухим насыщенным паром. Давление в барабане  $10 \text{ кг/см}^2$ . Давление в топке  $1 \text{ кг/см}^2$ .

Определить объем пара в конце процесса взрыва и работу расширения пара в этом процессе, если считать, что он протекал изотропически

Ответ:  $V_2=1100 \text{ м}^3$ ,  $L=258 \text{ Мдж}$ .

9-36. 1 кг водяного пара, имея параметры  $p_1=130 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1=565^\circ \text{С}$  изотропически расширяется до давления  $p_2=0,04 \text{ кг/см}^2$ .

Рассчитать процесс, т. е. найти «недостающие» параметры ( $t$ ,  $v$ ,  $i$ ,  $s$ ,  $x$ ) в начале и в конце процесса, определить величину работы расширения и изменение внутренней энергии.

Расчет сделать, пользуясь только таблицами, и проверить его при помощи  $i$ -с-диаграммы

Ответ:  $v_1=0,02810 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $i_1=3510 \text{ кДж/кг}$ ;

$$s_1=s_2=6,665 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ \text{К}; v_2=27,48 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$t_2=28,6^\circ \text{С}; x_2=0,775; i_2=2005 \text{ кДж/кг};$$

$$L = -(u_2 - u_1) = 1264 \text{ кДж/кг.}$$

9-37. Пар, имеющий параметры  $p_1=34 \text{ кг/см}^2$  и  $x_1=98\%$ , изотропически сжимается до  $p_2=85 \text{ кг/см}^2$ .

Найти температуру и энтальпию пара в конечном состоянии. Определить величину работы сжатия и изменение внутренней энергии 1 кг пара

Задачу решить, пользуясь только таблицами.

Ответ:

$$t_2=348,3^\circ \text{С}; i_2=2906 \text{ кДж/кг};$$

$$L = -\Delta u = -158,7 \text{ кДж/кг.}$$

9-38. Покрытый тепловой изоляцией резервуар объемом  $V=10 \text{ м}^3$  наполовину заполнен водой при температуре насыщения и наполовину сухим насыщенным паром. Давление в резервуаре  $p_1=94 \text{ кг/см}^2$ . Быстро открывая задвижку 1 (рис. 9-13), выпускают пар в атмосферу до тех пор, пока давление в резервуаре не становится равным  $p_2=60 \text{ кг/см}^2$ , после чего задвижку закрывают. Ка-



кой объем будет занимать пар, оставшийся в барабане, после закрытия задвижки?

Процесс изменения состояния  $H_2O$  в резервуаре считать изотропическим.

Ответ:  $V_{п. 2} = 5,82 \text{ м}^3$ .

9-39. Вода в состоянии насыщения при температуре  $t_1 = t_s = 28,641^\circ \text{C}$  подается в насос, который изотропически сжимает ее в одном случае до  $30 \text{ кг/см}^2$  и во втором до  $300 \text{ кг/см}^2$ . Определить энтальпию и внутреннюю энергию 1 кг воды в конце процесса сжатия в обоих случаях.

Ответ: 1)  $i_2 = 123,2 \text{ кДж/кг}$ ;  $u_2 = 120,2 \text{ кДж/кг}$ ;

2)  $i_2 = 149,5 \text{ кДж/кг}$ ;  $u_2 = 120,2 \text{ кДж/кг}$ .

9-40. 1 кг водяного пара сжимается изотермически. При этом состояние пара меняется так, что начальные его параметры  $p_1 = 32 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1 = 360^\circ \text{C}$ , а конечные — соответствуют состоянию кипящей жидкости. Определить параметры в конце процесса и количество отведенного тепла.

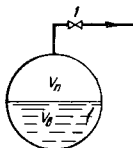


Рис. 9-13. К задаче 9-38

Ответ:  $p_2 = 190,42 \text{ кг/см}^2$ ;  $v_2 = 0,001894 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  
 $i_2 = 420,7 \text{ ккал/кг}$ ,  $s_2 = 0,9345 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ \text{K}$ ;  
 $q = -428 \text{ ккал/кг}$ .

9-41. В цилиндре под поршнем находится пароводяная смесь при давлении  $p_1 = 92 \text{ кг/см}^2$  и степени сухости  $x_1 = 0,125$ . Первоначальный объем смеси  $V_1 = 10 \text{ м}^3$ . К содержимому цилиндра изотермически подводится тепло в количестве  $Q = 6 \cdot 10^6 \text{ кДж}$ . Определить начальные и конечные параметры состояния вещества ( $p$ ,  $t$ ,  $v$ ,  $i$ ,  $s$ ), изменение его внутренней энергии и работу, произведенную при расширении.

Представить процесс в  $i/s$ -диаграмме.

### Решение

Начальные параметры находятся при помощи таблиц. По таблицам параметров на пограничных линиях находим при  $p_1 = 92 \text{ кг/см}^2$ .  $t_1 = t_2 = 303,49^\circ \text{C}$  или  $T_1 = T_2 = 576,64^\circ \text{K}$

Удельный объем смеси

$$v_1 = (1 - x_1) v' + x_1 v'' = 0,875 \cdot 0,001418 + 0,125 \cdot 0,02042 = 0,00380 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Энтальпия

$$-r_1 x_1 = 325,9 + 329,1 \cdot 0,125 = 367,0 \text{ ккал/кг}$$

$$= 0,7854 + \frac{329,1 \cdot 0,125}{577} = 0,8561 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ \text{K}.$$

х параметры на пограничных линиях и значение  $p_1 = 92 \text{ кг/см}^2$ .

Определим теперь энтропию в конечной точке процесса. Для изотермического процесса имеем:

$$s_2 = s_1 + \frac{Q}{mT},$$

где  $m$  — масса вещества в цилиндре, равная

$$m = V_1/v_1, \text{ кг.}$$

Следовательно,

$$s_2 = 0,856 + \frac{6 \cdot 10^6 \cdot 0,00380}{4,1868 \cdot 10 \cdot 576,64} = 1,800 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{K}.$$

Остальные параметры в конце процесса находим по  $i$ -диаграмме. При  $t=303,5^\circ\text{C}$  и  $s_2=1,800 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{K}$  определяем:  $p_2=4,4 \text{ кг/см}^2$ ;  $i_2=733,5 \text{ ккал/кг}$ ;  $v_2=0,61 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Более точно эти параметры можно определить по таблицам, интерполируя дважды — по вертикали и по горизонтали.

Находим теперь изменение внутренней энергии  $\Delta U$ :

$$\begin{aligned} \Delta U &= m(u_2 - u_1) = m[(i_2 - p_2 v_2) - (i_1 - p_1 v_1)] = m[(i_2 - i_1) - \\ &\quad - (p_2 v_2 - p_1 v_1)] = \frac{10}{0,00380} \left[ (733,5 - 367,0) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{10^4}{427} (4,4 \cdot 0,61 - 92 \cdot 0,00380) \right] = 0,819 \text{ Гкал} = 3,43 \text{ Гдж}. \end{aligned}$$

Работа расширения определяется из уравнения первого закона термодинамики.

$L = Q - \Delta U = 6 \cdot 10^6 - 3,43 \cdot 10^6 = 2,57 \cdot 10^6 \text{ кдж} = 2,57 \text{ Гдж} = 0,614 \text{ Гкал}$ .  
9-42. К 1 кг воды при давлении  $p_1=200 \text{ кг/см}^2$  и температуре  $t_1=320^\circ\text{C}$  изотермически подводится  $q=1710 \text{ кдж/кг}$  тепла. Определить параметры ( $p_2, v_2, i_2, s_2$ ) в конце процесса, изменение внутренней энергии и работу расширения.

**Ответ:**  $p_2 = 51,9 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ;  $v_2 = 0,04615 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  
 $i_2 = 2974 \text{ кдж/кг}$ ;  $s_2 = 6,279 \text{ кдж/кг} \cdot ^\circ\text{K}$ ;  
 $\Delta u = 1320 \text{ кдж/кг}$ ;  $l = 390 \text{ кдж/кг}$ .

## 10. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

При решении задач этого раздела следует пользоваться  $i$ -диаграммой влажного воздуха (рис. 10-1), если не сделано никаких оговорок.

10-1. При определении состояния влажного воздуха с помощью психрометра зафиксировано, что сухой термометр показывает  $20^\circ\text{C}$ , а влажный  $15^\circ\text{C}$ . Найти влагосодержание  $d$ , относительную влажность  $\phi$ , энтальпию  $i$ , а также температуру точки росы для этого воздуха.

**Ответ:**  $d=9,2 \text{ г/кг с. в.}$ ;  $\phi=62\%$ ;  $i=10,4 \text{ ккал/кг с. в.}$ ;  $t_p=-12,6^\circ\text{C}$ .

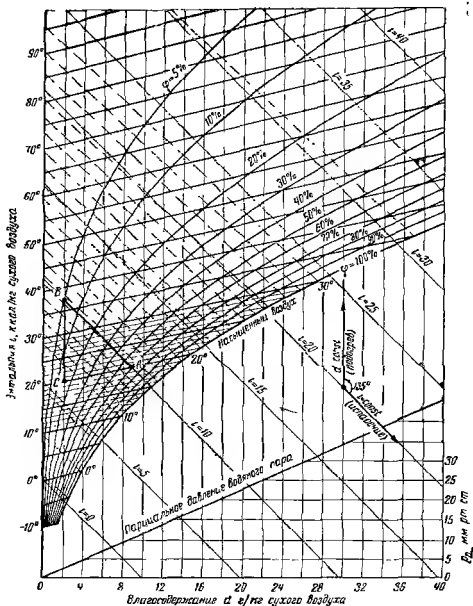


Рис. 10-1.

*t-d*-диаграмма влажного воздуха, при  $p=745$  мм рт. ст.

10-2. Состояние влажного воздуха задано параметрами:  $t=25^\circ\text{C}$  и  $\varphi=0,6$ . С помощью таблиц водяного пара определить парциальное давление водяных паров в воздухе.

Ответ:  $p_n=0,0190 \cdot 10^6$  н/м<sup>2</sup>.

10-3. Состояние влажного воздуха при температуре  $20^\circ\text{C}$  определяется с помощью гигрометра, которым измерена температура точки росы, равная  $10^\circ\text{C}$ .

Определить относительную влажность  $\varphi$ , влагосодержание  $d$  и энтальпию  $i$  влажного воздуха.

Ответ:  $\varphi=52\%$ ;  $d=7,8$  г/кг с. в.;  $i=9,5$  ккал/кг с. в.

10-4. В сушильной установке производится подсушка топлива с помощью воздуха при атмосферном давлении. От начального состояния с температурой  $t_1=20^\circ\text{C}$  и относительной влажностью  $\varphi=40\%$  воздух предварительно подогревается до температуры  $80^\circ\text{C}$  и далее направляется в сушилку, где в процессе осушивания топлива охлаждается до  $35^\circ\text{C}$ . Рассчитать необходимое количество тепла  $q$  для испарения 1 кг влаги, параметры воздуха на выходе из сушильной камеры и количество воды, которое отбирает каждый килограмм сухого воздуха от топлива. Считать, что тепловые потери отсутствуют, а топливо уже подогрето до  $80^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $q=812$  ккал на 1 кг испаренной влаги. С каждым килограммом сухого воздуха уходит 18,0 г воды. На выходе из сушильной камеры параметры воздуха следующие:  $d=23,9$  г/кг с. в.,  $\varphi=66\%$ ,  $i=22,9$  ккал/кг с. в.

10-5. Начальное состояние воздуха задано параметрами:  $t=20^\circ\text{C}$ ,  $d=8$  г/кг с. в.,  $p=745$  мм рт. ст. Воздух сжимается адиабатически до давления  $6$  кг/см<sup>2</sup> и затем охлаждается.

Определить, при какой температуре начнется выделение влаги из этого воздуха. Для решения задачи воспользоваться  $i$ - $d$ -диаграммой и таблицами водяного пара

### Решение

По  $i$ - $d$ -диаграмме находим, что относительная влажность  $\varphi=54\%$ . Следовательно, парциальное давление водяных паров равно:  $p=p_{\text{в}}=0,54 \cdot 0,02383=0,01287$  кг/см<sup>2</sup>, где значение давления насыщения  $p_{\text{в}}$  взято из таблиц водяного пара. Так как парциальное давление водяных паров будет увеличиваться пропорционально общему давлению влажного воздуха, то парциальное давление водяного пара при  $6$  кг/см<sup>2</sup> будет равно:

$$p = \frac{0,01287 \cdot 735,6 \cdot 6}{745} = 0,076 \text{ кг/см}^2.$$

Это давление водяного пара соответствует температуре насыщения  $40,3^\circ\text{C}$ , при которой и начнется выпадение воды из воздуха.

10-6. Начальное состояние влажного воздуха при атмосферном давлении задано параметрами:  $t=25^\circ\text{C}$ ,  $\varphi=70\%$ . Воздух охлаждается до температуры  $15^\circ\text{C}$ .

Определить, сколько влаги выпадет из каждого килограмма воздуха.

Ответ:  $\Delta d=3,4$  г/кг с. в.

10-7. Определить плотность влажного воздуха при параметрах:  $t=320^\circ\text{C}$ ,  $p=2,6$  кг/см<sup>2</sup>,  $d=30$  г/кг с. в.

### Решение

Находим газовую постоянную влажного воздуха  $R_{\text{в.л.в.}}=g_{\text{с.в.}}R_{\text{с.в.}}+g_{\text{в.п.}} \cdot R_{\text{в.п.}}$ , где надесы «с.в.» и «в.п.» относятся к сухому воздуху и водяному пару.

$$R_{\text{в.л.в.}} = \frac{1}{1+d} R_{\text{с.в.}} + \frac{d}{1+d} R_{\text{в.п.}} = \frac{1}{1,030} \cdot \frac{8314}{28,96} + \frac{0,030}{1,030} \cdot \frac{8314}{18,016} = 292,15 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}.$$

Плотность влажного воздуха определяется из уравнения Клапейрона

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{2,6 \cdot 98066,5}{292,15 \cdot 593,15} = 1,471 \text{ кг/м}^3.$$

10-8. Для осушивания воздуха его продувают через слой вещества, поглощающего влагу (алюмогель, силикагель). Начальное состояние воздуха задано параметрами  $t_1=15^\circ\text{C}$ ,  $d_1=8 \text{ г/кг}$  с.б. Определить температуру воздуха на выходе из подсушивающего устройства, если воздух при этом имеет влагосодержание  $d_2=2 \text{ г/кг}$  с.б. Теплообмен с окружающей средой отсутствует.

Ответ:  $t_2=31^\circ\text{C}$ .

10-9. Эффект охлаждения при омывании влажной ткани воздухом можно использовать для создания примитивного холодильника.

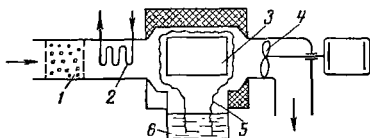


Рис. 10-2 К задаче 10 9

Этот эффект можно усилить предварительной осушкой воздуха. На рис. 10-2 дана схема такого холодильника, который представляет собою трубу, где последовательно расположены: 1 — вещество, поглощающее влагу (алюмогель, силикагель и т. п.); 2 — трубочный холодильник, по которому протекает водопроводная вода; 3 — холодильная камера; 4 — вентилятор

Холодильная камера обернута тканью 5, свободный конец которой помещен в резервуар с водой 6. Холодильная камера имеет тепловую изоляцию.

Рассчитать наименьшую температуру, которая может быть получена в таком холодильнике, если известно: воздух имеет параметры  $t=20^\circ\text{C}$ ,  $\varphi=60\%$ ; после прохождения через поглотитель влаги относительная влажность воздуха уменьшается до 5%; водопроводный холодильник охлаждает воздух до  $20^\circ\text{C}$ . Задачу решить с помощью  $id$ -диаграммы

### Решение

Начальное состояние воздуха отмечено на  $id$  диаграмме точкой  $A$  (рис. 10 1). Процесс подсушки воздуха при прохождении его через поглотитель и при отсутствии тепловых потерь пойдет по линии  $t=\text{const}$  и закончится в точке  $B$  при  $\varphi=5\%$  (температура при этом повысится до  $37^\circ\text{C}$ ). Процесс охлаждения воздуха в водопроводном холодильнике пойдет по линии  $d=\text{const}$  и закончится при  $t=20^\circ\text{C}$  (точка  $C$ ). Воздух состояния  $C$  оmyвает влажную ткань. При этом температура в камере понизится до температуры изотермы тумана, проходящей через точку  $C$ , т. е. в холодильнике может быть достигнута температура, равная  $8^\circ\text{C}$ .

Следует заметить, что действительный процесс подсушки воздуха пойдет с тепловыми потерями и температура в этом процессе будет повышаться мало; если же эти тепловые потери усилить оребрением теплоотдающей поверхности, то водопроводный холодильник в такой конструкции будет практически не нужен.

10-10. Построить  $i$ - $d$ -диаграмму влажного воздуха для давлений воздуха от 1 до 15  $\text{кг/см}^2$ , т. е. построить в  $i$ - $d$ -координатах линии  $\varphi=100\%$  для различных давлений.

### Решение

Диаграмму можно построить, принимая, что влажный воздух до 15  $\text{кг/см}^2$  является идеальным газом. В этом случае энтальпия  $i$  влажного воздуха зависит только от температуры и влагосодержаний пара  $d_n$  и воды  $d_{ж}$  в воздухе и рассчитывается по обычной формуле

$$i = 0,24t + 10^{-3}d_n(597 + 0,46t) + 10^{-3}d_{ж}t. \quad (1)$$

Положение линий  $\varphi=\text{const}=100\%$  определяется соотношением

$$d_n = 622 \frac{p_s}{p - p_s}, \quad (2)$$

где  $p_s$  — давление насыщения при данной температуре,  
 $p$  — давление влажного воздуха.

Произведя расчеты по этим двум формулам, можно построить требуемую диаграмму, которая была впервые опубликована в [Л. 12] и приведена также здесь (рис. 10-3).

На построенной диаграмме показаны изотермы области тумана, наклон которых определяется обычным соотношением

$$\left(\frac{\partial i}{\partial d_{ж}}\right)_t = 0,001t. \quad (3)$$

Изотермы области тумана нанесены пунктирными линиями и не привязаны к линиям  $\varphi=1$ .

Для нахождения относительной влажности сжатого воздуха можно воспользоваться тем, что относительная влажность прямо пропорциональна давлению сжатого воздуха, т. е.

$$\frac{p_1}{\varphi_1} = \frac{p_2}{\varphi_2}. \quad (4)$$

Учитывая, что в диаграмме имеются лишь линии  $\varphi=100\%$ , формулу (4) перепишем следующим образом:

$$\varphi_n = \frac{p}{p_{\varphi=100\%}}, \quad (5)$$

где  $p$  — давление сжатого воздуха,

$p_{\varphi=100\%}$  — значение давления на той линии  $\varphi=100\%$ , которая проходит через выбранную точку диаграммы.

По формуле (5) и производят расчет относительной влажности сжатого воздуха; эта формула написана также на  $i$ - $d$ -диаграмме (рис. 10-3).

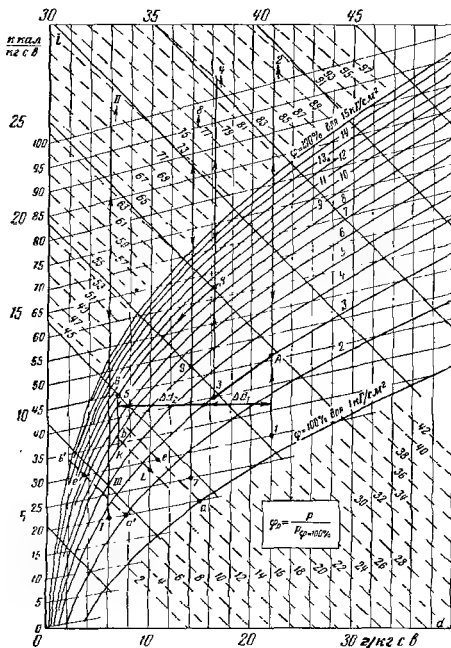


Рис. 10-3.

*id*-диаграмма влажного воздуха для давлений от 1 до 15 кг/см<sup>2</sup>  
(кривые  $\varphi=100\%$  для различных давлений)

10-11. Состояние влажного воздуха при атмосферном давлении определяется с помощью психрометра, причем сухой термометр показывает 30° С, а «мокрый» 20° С. Определить относительную влажность и влагосодержание воздуха с помощью *id*-диаграммы (рис. 10-3)\*.

\* Эта и все последующие задачи этого раздела решаются с помощью *id*-диаграммы (рис. 10-3)

### Решение

Прежде всего необходимо нанести на диаграмму изотерму «мокрого» термометра  $t=20^\circ\text{C}$  при  $1\text{ кГ/см}^2$ . Для этого (см. рис. 10-3) из точки  $a$  (из точки пересечения изотермы  $t=20^\circ\text{C}$  и линии  $\varphi=100\%$  для  $1\text{ кГ/см}^2$ ) проводим линию, параллельную изотерме тумана при  $20^\circ\text{C}$  — линию  $ab$ ; на пересечении линии  $ab$  и изотермы  $t=30^\circ\text{C}$  находим точку  $e$ , определяющую состояние воздуха. В этом состоянии по диаграмме определяем влагосодержание  $d=11\text{ г/кг с. в.}$ . Относительная влажность рассчитывается по формуле, написанной на диаграмме

$$\varphi_p = \frac{p}{p_{\varphi=100\%}} = \frac{1}{2,5} = 0,4$$

В этом случае  $p_{\varphi=100\%} = 2,5\text{ кГ/см}^2$  (соответствует точке  $e$ ).

Можно легко убедиться, что по обычной  $id$ -диаграмме получается такой же результат.

Для атмосферного давления проще пользоваться обычной диаграммой.

**10-12.** В трубе, по которой протекает воздух при давлении  $2\text{ кГ/см}^2$ , находятся сухой и «мокрый» термометры; показания их тумана соответственно  $30$  и  $20^\circ\text{C}$ .

Требуется определить влагосодержание  $d$  и относительную влажность  $\varphi$  проходящего воздуха.

### Решение

На  $id$ -диаграмме необходимо провести изотерму тумана при  $t=20^\circ\text{C}$  и  $p=2\text{ кГ/см}^2$  (рис. 10-3). Эта линия будет проходить параллельно пунктирной с температурой  $t=20^\circ\text{C}$  и начинаться она будет в точке  $a'$  (в точке пересечения изотермы  $t=20^\circ\text{C}$  и линии  $\varphi=100\%$  для  $2\text{ кГ/см}^2$ ) — линия  $a'b'$ . Аналогично задаче 10-11 находим точку  $e'$ , которая соответствует состоянию воздуха. Влагосодержание здесь равно  $d=3,5\text{ г/кг с. в.}$ . Относительная влажность  $\varphi$  рассчитывается по формуле, приведенной на диаграмме,

$$\varphi_p = \frac{p}{p_{\varphi=100\%}} = \frac{2}{8} = 0,25.$$

**10-13.** Воздух, имеющий параметры  $t=20^\circ\text{C}$ ,  $p=1\text{ кГ/см}^2$ ,  $d=6\text{ г/кг с. в.}$ , сжимается в компрессоре до давления  $4\text{ кГ/см}^2$  и охлаждается затем в трубах.

Определить, при какой температуре начнется выпадение воды?

### Решение

На рис. 10-3 начальное состояние обозначено точкой  $I$ . Процесс сжатия воздуха будет изображаться линией  $I-II$  при  $d=\text{const}$ . Температура при сжатии повышается; конечная точка при сжатии выйдет, вероятно, за пределы диаграммы. Последующий процесс охлаждения будет идти также по прямой  $d=6\text{ г/кг с. в.}=\text{const}$  сверху вниз. Выпадение влаги начнется тогда, когда в процессе охлаждения будет достигнуто состояние насыщения воздуха при  $d=6\text{ г/кг с. в.}$  и  $p=4\text{ кГ/см}^2$ , т. е. на линии  $\varphi=100\%$  для  $4\text{ кГ/см}^2$  — точка  $III$ .



По диаграмме находим, что выпадение влаги начнется при  $t=27,5^\circ\text{C}$ . Из диаграммы видно, что если бы в данном случае воздух сжимался до  $10\text{ кг/см}^2$ , то выпадение влаги началось бы уже при  $45^\circ\text{C}$ .

10-14. Влажный воздух при начальных параметрах  $p_1=6\text{ кг/см}^2$ ,  $t_1=55^\circ\text{C}$  и  $d_1=10\text{ г/кг}$  с. в. направляется по трубопроводу к потребителю, постоянно охлаждаясь по мере движения в трубах

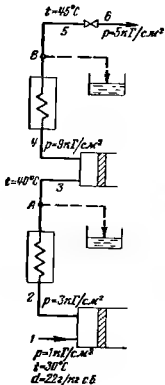


Рис. 10-4 К задаче 10-16.

При какой температуре  $t_2$  начнет выпадать вода из воздуха, если при расчете пренебречь снижением давления вследствие гидравлических сопротивлений?

Какова будет температура  $t_2$  в начале выпадения воды, если этот воздух пройдет через дроссельный вентиль, и манометр, измеряющий давление воздуха после дросселя, покажет  $p_{изб}=2\text{ кг/см}^2$ ?

Ответ:  $t_2=44^\circ\text{C}$  и  $t_2=32^\circ\text{C}$

10-15. Воздух с параметрами  $t_1=15^\circ\text{C}$ ,  $p=1\text{ кг/см}^2$  и  $d_1=10\text{ г/кг}$  с. в. сжимается с отводом тепла. Параметры воздуха в конце процесса сжатия  $t_2=60^\circ\text{C}$ ;  $p_2=7\text{ кг/см}^2$

Определить относительную влажность в конце процесса сжатия

Ответ:  $\varphi_2=55\%$ .

10-16. На рис 10-4 изображена схема сжатия воздуха в двухступенчатом компрессоре с промежуточными холодильниками и отбором влаги, а также с последующим дросселированием воздуха. Параметры воздуха указаны на схеме. Необходимо проследить по диаграмме весь путь воздуха, определить температуру начала выпадения воды, количество выпадающей воды и относительную влажность подаваемого потребителю воздуха. При решении этой задачи предполагается, что удастся отсепарировать и удалить всю выпавшую влагу.

### Решение

Процесс сжатия воздуха в первой ступени компрессора изображается линией 1—2 при  $d=22\text{ г/кг}$  с. в. (см. рис 10-3). При охлаждении воздуха в первом холодильнике (давление воздуха  $3\text{ кг/см}^2$ ) начнется выпадение воды при температуре  $t=46^\circ\text{C}$ . На диаграмме этот момент отмечен точкой А, т. е. точкой пересечения прямой  $d=22\text{ г/кг}$  с. в. и кривой  $\varphi=100\%$  для  $3\text{ кг/см}^2$ .

Если вся выпадающая влага будет удаляться из воздуха, то дальнейшее охлаждение воздуха до  $40^\circ\text{C}$  пойдет по линии  $\varphi=100\%$  для  $3\text{ кг/см}^2$  (отрезок А—3) и во вторую ступень компрессора будет подаваться насыщенный воздух ( $\varphi=100\%$ ) при  $p=3\text{ кг/см}^2$  и  $t=40^\circ\text{C}$  (состояние 3). Аналогично этому для второй ступени компрессора процесс сжатия изображен на диаграмме линией 3—4, охлаждение — линией  $d=\text{const}$ . Выпадение влаги начнется в точке В, т. е. при температуре  $63^\circ\text{C}$ , а из холодильника вто-

рой ступени воздух выйдет при  $t=45^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi=100\%$  и  $p=9\text{ кг/см}^2$ —состояние 5.

Для уменьшения относительной влажности воздух дросселируется до  $5\text{ кг/см}^2$  (состояние 6). При этом на *id*-диаграмме точки 5 и 6 совпадают, так как энтальпия и влагосодержание в процессе дросселирования не изменяются. Температура при дросселировании, согласно предположению об идеальности влажного воздуха, остается постоянной.

Относительная влажность воздуха в состоянии 6 будет уже менее  $100\%$ . Рассчитывается она по формуле, написанной на диаграмме

$$\varphi_p = \frac{p}{p_{\varphi=100\%}} = \frac{5}{9} = 0,56, \text{ т. е. } \varphi = 56\%.$$

Из диаграммы (рис. 10-3) видно, что если выходящий из компрессорной станции воздух (состояние 6) будет в дальнейшем охлаждаться в трубах, то выпадение влаги начнется при температуре  $t=33^{\circ}\text{C}$ .

При условии полной сепарации влаги после первого холодильника из каждого килограмма воздуха будет удалено воды  $\Delta d_1 = 22 - 16,2 = 5,8\text{ г}$ , а после второго холодильника будет отсепарировано  $\Delta d_2 = 16,2 - 6,8 = 9,4\text{ г}$  на каждый килограмм сухого воздуха.

10-17. Параметры воздуха перед сжатием его в компрессоре таковы:  $p_1=1\text{ кг/см}^2$ ,  $t_1=25^{\circ}\text{C}$ ,  $d=14\text{ г/кг с. в.}$  Воздух сжимается до  $5\text{ кг/см}^2$  и охлаждается затем до  $t=35^{\circ}\text{C}$ , причем в процессе охлаждения удастся отделить воду в количестве  $4\text{ г/кг с. в.}$  После этого воздух дросселируется до давления  $p=2\text{ кг/см}^2$ . Необходимо определить относительную влажность воздуха после дросселя, а также температуру, при которой начнет выпадать вода из этого воздуха.

### Решение

Процесс сжатия воздуха (рис. 10-3) изобразится вертикальной линией 7-8, процесс охлаждения — линией 8-9, выпадение влаги начнется в точке 9, где при давлении  $5\text{ кг/см}^2$  будет достигнута относительная влажность  $\varphi=100\%$ . Дальнейшее охлаждение пойдет с выпадением влаги. Если бы из воздуха удалось удалить всю выпавшую влагу, то (см. задачу 10-16) в конце охлаждения до  $35^{\circ}\text{C}$  в воздухе осталось бы воды  $7,2\text{ г/кг с. в.}$ , т. е. было бы удалено воды  $14 - 7,2 = 6,8\text{ г/кг с. в.}$  Однако в соответствии с условием настоящей задачи удаляется лишь  $4\text{ г/кг с. в.}$  Следовательно, после охлаждения до  $35^{\circ}\text{C}$  и удаления части влаги в воздухе останется вода в виде тумана. Для определения состояния такого воздуха нужно учесть, что влагосодержание его будет равно  $10\text{ г/кг с. в.}$ , а температура равна  $35^{\circ}\text{C}$ . Изотерма области тумана (она же изотерма мокрого термометра) при давлении  $p=5\text{ кг/см}^2$  и температуре  $t=35^{\circ}\text{C}$  представлена линией *KL* (о построении такой линии говорится в задачах 10-11 и 10-12); здесь она направлена в область тумана при  $p=5\text{ кг/см}^2$ . Точка *L* отвечает, очевидно, искомому состоянию воздуха. Дросселирование воздуха не изменит положения точки *L* на *id*-диаграмме, однако после дросселирования до давления  $2\text{ кг/см}^2$  воздух станет ненасыщенным, так как точка *L* окажется выше линии  $\varphi=100\%$  для  $2\text{ кг/см}^2$ . В данном случае при дросселировании влажного воздуха, в котором вода на-

ходится в виде тумана, температура воздуха понижается. Так, в состоянии  $L$  при  $p = 2 \text{ кг/см}^2$  температура воздуха равна  $28^\circ \text{C}$  (см рис 10.3). Относительная влажность в этом состоянии рассчитывается, как и в предыдущих задачах

$$\varphi_p = \frac{p}{p_{\text{ф}} - 100\%} = \frac{2}{2,4} = 0,83.$$

Принято, что через точку  $L$  проходит линия  $\varphi = 100\%$  для давления  $p = 2,4 \text{ кг/см}^2$ . Как видно из диаграммы, воздух в состоянии  $L$ , охлаждающийся в трубах при  $2 \text{ кг/см}^2$ , будет выделять влагу при  $t = 23^\circ \text{C}$ .

## 11. ТЕРМОДИНАМИКА ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

11-1. Через суживающееся сопло вытекает кислород, находящийся в резервуаре, давление и температура в котором постоянны и равны  $p_1 = 60 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1 = 100^\circ \text{C}$ . Давление в той среде, куда вытекает газ, равно  $p_{\text{ср}} = 36 \text{ кг/см}^2$ .

Определить скорость истечения и расход кислорода, если площадь выходного сечения  $f_2 = 20 \text{ мм}^2$ . Расчет произвести, используя а) техническую систему и б) международную систему единиц СИ. Газ подчиняется уравнению  $p = RT$ , теплоемкость не зависит от температуры<sup>1</sup>. Входной скоростью пренебречь. Процесс изменения состояния текущего газа — изэнтропический.

### Решение

а) Прежде всего необходимо узнать, каков режим истечения газа, будет ли в выходном сечении дозвуковая или звуковая скорость.

Для этого сравниваем отношение давлений  $\beta = p_{\text{ср}}/p_1$  с критическим отношением давлений  $\beta_{\text{кр}} = p_{\text{кр}}/p_1 = \left[ \frac{2}{k+1} \right]^{k/(k-1)}$ . Для кислорода  $k = 1,4$  и  $\beta_{\text{кр}} = 0,528$ . Следовательно, имеем.

$$\frac{p_{\text{ср}}}{p_1} = \frac{36}{60} > \beta_{\text{кр}} = 0,528.$$

Таким образом, мы выяснили, что на выходе из сопла скорость оказывается дозвуковой, а давление  $p_2$  в выходном сечении равно давлению среды  $p_{\text{ср}}$ .

Определяем скорость истечения.

$$\begin{aligned} c_2 &= \sqrt{2g \frac{k}{k-1} RT_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \\ &= \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{1,4}{1,4-1} \cdot \frac{848}{32} \cdot 373 \left[ 1 - \left( \frac{36}{60} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]} = 304 \text{ м/сек.} \end{aligned}$$

<sup>1</sup> Эти два условия приняты во всех задачах этого раздела, кроме задач, в которых рассматривается течение водяного пара.

Секундный весовой расход газа.

$$G = f \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} =$$

$$= 20 \cdot 10^{-6} \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{1,4}{1,4-1} \cdot \frac{60 \cdot 10^4}{0,01647} \left[ \left( \frac{36}{60} \right)^{\frac{2}{1,4}} - \left( \frac{36}{60} \right)^{\frac{1,4+1}{1,4}} \right]} =$$

$$= 0,256 \text{ кг/сек}$$

Здесь

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{848 \cdot 373}{32 \cdot 60 \cdot 10^4} = 0,01647 \text{ м}^3/\text{кг}$$

6) При пользовании системой СИ формула для подсчета скорости истечения принимает вид

$$c_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \text{ м/сек},$$

где  $R = 8314/32 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$

Следовательно,

$$c_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{1,4-1} \cdot \frac{8314}{32} \cdot 373 \left[ 1 - \left( \frac{36}{60} \right)^{0,2857} \right]} = 304 \text{ м/сек}.$$

Расчет массового расхода сделаем иным способом. Определим удельный объем в выходном сечении

$$v_2 = v_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,01647 \left( \frac{60}{36} \right)^{1,4} = 0,02375 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Массовый расход находим по формуле неразрывности:

$$m = \frac{f_2 c_2}{v_2} = \frac{20 \cdot 10^{-6} \cdot 304}{0,02375} = 0,256 \text{ кг/сек}$$

11-2. Двухатомный газ, для которого  $R = 294,3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$ , имея на входе в суживающееся сопло параметры  $p_1 = 63,7 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  и  $T_1 = 300^\circ \text{ К}$ , вытекает через сопло в среду с давлением  $p_{\text{ср}} = 35,4 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$

Определить скорость истечения и секундный расход газа, если диаметр отверстия равен 5 мм. Истечение считать адиабатическим, потерей на трение и входной скоростью пренебречь

Ответ:  $c_2=310$  м/сек;  $m=0,257$  кг/сек.

11-3. Как изменяется скорость и секундный расход газа (задача 11-2), если он вытекает в среду с давлением  $p_{c1}=0,981 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>?

### Решение

В этом случае  $\beta = \frac{0,981}{63,7} < \beta_{кр} = 0,528$ , поэтому на выходе из сопла установится критическое давление  $p_{кр} = \beta_{кр} p_1$ , скорость истечения будет звуковой, а расход максимальным.

Скорость

$$c_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} RT_1} = v \sqrt{RT_1}, \text{ м/сек.}$$

Расход

$$m = f_2 \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{p_1}{v_1}} = f_2 \psi \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}, \text{ кг/сек.}$$

Вычислим значения постоянных коэффициентов  $v$  и  $\psi$  для идеальных газов различной атомности и результаты вычисленийведем в таблицу:

| Газ                            | $k$  | $v$   | $\psi$ |
|--------------------------------|------|-------|--------|
| Одноатомный . . . . .          | 1,67 | 1,118 | 0,726  |
| Двухатомный . . . . .          | 1,40 | 1,080 | 0,685  |
| Трех- и многоатомный . . . . . | 1,33 | 1,068 | 0,674  |

Находим величину расхода:

$$m = 5^2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,785 \cdot 0,685 \sqrt{\frac{63,7 \cdot 10^5}{0,01386}} = 0,288 \text{ кг/сек.}$$

Значение скорости истечения

$$c_2 = 1,080 \sqrt{294,3 \cdot 300} = 321 \text{ м/сек.}$$

Проверяем, действительно ли эта скорость является звуковой. Скорость звука в выходном сечении равна:

$$a_2 = \sqrt{kRT_2},$$

где  $T_2 = T_1 \beta_{кр}^{(k-1)/k} = 300 \cdot 0,528^{0,286} = 250$  °К.

Следовательно,

$$a_2 = \sqrt{1,40 \cdot 294,3 \cdot 250} = 321 \text{ м/сек.}$$

11-4. Определить размеры характерных сечений сопла Лавалля, если давление воздуха на входе в сопло  $p_1=6,87 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>, температура на входе в сопло  $t_1=27^\circ$  С Наружное давление  $p_{cr}=0,981 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>. Расход воздуха  $m=7200$  кг/ч. Как изменяется скорость и расход, если температура воздуха на входе в сопло станет равной  $177^\circ$  С? Как нужно изменить сопло, чтобы расход остался прежним?

Ответ:  $f_{\text{мин}}=1\ 250\ \text{мм}^2$ ;  $f_2=2\ 300\ \text{мм}^2$ ;  $c_2=497\ \text{м/сек}$ .

При  $t_1=177^\circ\text{C}$  расход будет равен  $5\ 904\ \text{кг/ч}$ . Чтобы сохранить его прежним, следует минимальное сечение увеличить до  $f'_{\text{мин}}=1\ 525\ \text{мм}^2$ .

11-5. Воздух с начальной скоростью  $c_1=250\ \text{м/сек}$  при давлении  $p_1=10\ \text{кг/см}^2$  и температуре  $t_1=350^\circ\text{C}$  вытекает через суживающийся насадок в среду с давлением  $p_{\text{ср}}=2,5\ \text{кг/см}^2$ . Площадь выходного сечения  $f_2=1\ 500\ \text{мм}^2$ .

Определить расход воздуха и скорость истечения.

### Решение

Учесть начальную скорость потока можно, воспользовавшись параметрами торможения, считая, что скорость потока  $c_1$  возникает в результате расширения газа от некоторых параметров  $p_0$ ,  $v_0$ , соответствующих параметрам торможения (при  $c_0=0$ ) до начальных параметров  $p_1$  и  $v_1$ . При этом формулы для подсчета критической скорости и секундного расхода (режим по условию задачи звуковой) сохраняют свой обычный вид.

$$c_{\text{кр}} = c_2 = \sqrt{\gamma p_0 v_0} \quad \text{м/сек};$$

$$m_{\text{макс}} = m = f_2 \sqrt{\frac{p_0}{v_0}}, \quad \text{кг/сек}.$$

Параметры  $p_0$  и  $v_0$  определяются следующим образом. Из уравнения энергии потока при адиабатическом течении

$$i_0 + \frac{c_0^2}{2} = i_1 + \frac{c_1^2}{2}$$

следует при  $c_0=0$  (учитывая, что для идеального газа  $i=c_p T$ , где теплоемкость  $c_p$  есть постоянная величина, равная согласно уравнению Майера  $c_p=kR/k-1$ ):

$$T_0 = T_1 + \frac{c_1^2}{2c_p} = T_1 + \frac{c_1^2}{2} \cdot \frac{k-1}{kR},$$

откуда

$$\frac{T_0}{T_1} = 1 + \frac{c_1^2}{2} \cdot \frac{k-1}{kRT_1}.$$

Так как в случае обратимого адиабатического процесса  $T_0/T_1 = (p_0/p_1)^{(k-1)/k}$ , то

$$\frac{p_0}{p_1} = \left( 1 + \frac{k-1}{2} \cdot \frac{c_1^2}{kRT_1} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Отношение удельных объемов

$$\frac{v_1}{v_0} = \left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = \left( 1 + \frac{k-1}{2} \cdot \frac{c_1^2}{kRT_1} \right)^{\frac{1}{k-1}}.$$

Из двух последних соотношений находим  $p_0$  и  $v_0$ , учитывая, что  $v_1 = RT_1/p_1$ :

$$p_0 = 10 \cdot 0,980665 \cdot 10^5 \left( 1 + \frac{1,4-1}{2} \frac{250^2 \cdot 28,96}{1,4 \cdot 8314 \cdot 623} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} =$$

$$= 11,63 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2;$$

$$v_0 = \frac{8314 \cdot 623}{28,96 \cdot 10 \cdot 0,980665 \cdot 10^5} \cdot \frac{1}{\left( 1 + \frac{1,4-1}{2} \frac{250^2 \cdot 28,96}{1,4 \cdot 8314 \cdot 623} \right)^{\frac{1}{1,4-1}}} =$$

$$= 0,1615 \text{ м}^2/\text{кг}.$$

Теперь можно найти  $c_2$  и  $m$ , взяв значения  $\gamma$  и  $\phi$  из таблицы, приведенной в решении задачи 11-3.

$$c_2 = 1,080 \sqrt{11,63 \cdot 10^5 \cdot 0,1615} = 468 \text{ м/сек};$$

$$m = 1500 \cdot 10^{-6} \cdot 0,685 \sqrt{\frac{11,63 \cdot 10^5}{0,1615}} = 2,76 \text{ кг/сек}.$$

**11-6.** Найти диаметр выходного сечения суживающегося сопла, через которое протекает азот в количестве  $m=3,5$  кг/сек. Параметры на входе  $p_1=10^6$  н/м<sup>2</sup> и  $t_1=217^\circ$  С. Давление среды  $p_{ср}=10^5$  н/м<sup>2</sup>. Определить скорость истечения, пренебрегая входной скоростью и потерями на трение.

Ответ:  $d=50$  мм;  $c_2=412$  м/сек.

**11-7.** Рассчитать сопло Лаваля и найти скорость истечения воздуха из него. Расход воздуха  $m=2,9$  кг/сек, давление и температура газа на входе  $p_1=8$  кг/см<sup>2</sup> и  $t_1=127^\circ$  С. Давление среды  $p_{ср}=1$  кг/см<sup>2</sup>. Сечения сопла круглые, угол раствора конусообразной расширяющейся части  $\gamma=12^\circ$ . Входной скоростью и потерями на трение пренебречь.

Ответ:  $d_{\text{вх}}=48$  мм,  $d_2=63$  мм; длина расширяющейся части 70 мм. Скорость  $c_2=600$  м/сек.

**11-8.** Определить скорость воздуха во всасывающем клапане двигателя внутреннего сгорания, если разрежение в цилиндре  $0,05$  кг/см<sup>2</sup>, внешнее давление  $p_1=1,02$  кг/см<sup>2</sup> и температура  $t_1=25^\circ$  С. Скоростной коэффициент  $\phi=0,95$ .

Ответ:  $c=93,5$  м/сек.

**11-9.** Рассчитать сопло Лаваля и найти скорость истечения из него кислорода  $O_2$ . Расход его  $m=3,0$  кг/сек. Постоянное давление на входе  $p_1=12 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>, температура  $t_1=227^\circ$  С. Давление среды  $p_{ср}=0,95 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>. Коэффициент скорости  $\phi=0,95$  считается одним и тем же для всех сечений. Входная скорость не учитывается. Угол раствора  $\gamma=10^\circ$ .

## Решение

Сначала найдем действительную скорость истечения  $c_{2д}$  и рассчитаем выходное сечение. Теоретическая (без потерь на трение) скорость равна:

$$c_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} =$$

$$= \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4-1} \frac{8314}{32} \cdot 500 \left[ 1 - \left( \frac{0,95}{12} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]} = 684 \text{ м/сек.}$$

Действительная скорость истечения

$$c_{2д} = \varphi c_2 = 0,95 \cdot 684 = 650 \text{ м/сек.}$$

Для того чтобы рассчитать площадь выходного сечения сопла, необходимо знать удельный объем в точке  $2д$ , который может быть найден из уравнения состояния  $v_{2д} = RT_{2д}/p_{2д}$ . Незвестную температуру  $T_{2д}$  можно найти, руководствуясь следующими соображениями. Мы имеем право записать уравнение сохранения энергии для адиабатического потока в таком виде:

$$i_2 + \frac{c_2^2}{2} = i_{2д} + \frac{c_{2д}^2}{2},$$

так как и левая и правая части этого уравнения порознь равны энтальпии полного торможения  $i_0$ . Это уравнение можно переписать:

$$c_p T_2 + \frac{c_2^2}{2} = c_p T_{2д} + \frac{\varphi^2 c_2^2}{2}.$$

Отсюда находим:

$$T_{2д} = T_2 + \frac{(1 - \varphi^2) c_2^2}{2c_p} = T_2 + \frac{k-1}{k} \cdot \frac{\xi c_2^2}{2R}.$$

Здесь  $\xi = 1 - \varphi^2$ , а  $c_p = \frac{k}{k-1} R$ . Температура  $T_2$  в конце изэнтропического расширения подсчитывается обычным путем:

$$T_2 = T_1 (p_2/p_1)^{(k-1)/k}.$$

Таким образом,

$$T_{2д} = 500 \left( \frac{0,95}{12} \right)^{0,2857} + \frac{1,4-1}{1,4} \frac{(1 - 0,95^2) \cdot 684^2 \cdot 32}{2 \cdot 8314} =$$

$$= 252 + 25 = 277^\circ \text{K.}$$

Удельный объем

$$v_{2д} = \frac{RT_{2д}}{p_{2д}} = \frac{8314 \cdot 277}{32 \cdot 0,95 \cdot 10^5} = 0,758 \text{ м}^3/\text{кг.}$$



Выходное сечение

$$f_2 = \frac{m v_{2л}}{c_{2л}} = \frac{3,0 \cdot 0,758}{650} = 0,00350 \text{ м}^2.$$

Диаметр выходного сечения

$$d_2 = \sqrt{\frac{4f_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,00350}{0,785}} = 0,0668 \text{ м} \approx 67 \text{ мм}.$$

Теперь необходимо рассчитать минимальное сечение сопла. Как известно, в минимальном сечении скорость вследствие потерь на трение не достигает скорости звука.

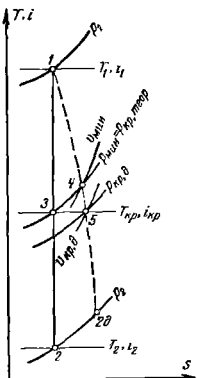


Рис. 11-1. К задаче 11-9.

звуковая скорость еще не достигается, газ продолжает расширяться и на некотором небольшом расстоянии от пережима сопла при давлении  $p_{кр,д}$  получает скорость, равную местной скорости звука (точка 5).

На основании сказанного выше скорость в минимальном сечении (состояние 4) равна:

$$c_{мин} = \varphi \sqrt{\gamma RT_1} = 0,95 \cdot 1,080 \sqrt{\frac{8 \cdot 314}{32} \cdot 500} = 370 \text{ м/сек}.$$

Здесь  $\varphi = 1,080$  (см. задачу 11-3).

Удельный объем  $v_{мин}$  в точке 4 находится по формуле  $v_{мин} = RT_{мин}/p_{мин}$ , в которой

$$p_{мин} = p_{кр,теор} = \beta_{кр} p_1 = 0,528 \cdot 12 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2,$$

а температура  $T_{\text{мин}}$  находится аналогично тому, как находилась  $T_{\text{зд}}$ :

$$\begin{aligned} T_{\text{мин}} &= T_{\text{кр}} + \frac{k-1}{k} \frac{\zeta a_*^2}{2R} = T_{\text{кр}} + \frac{k-1}{k} \cdot \frac{\zeta k R T_{\text{кр}}}{2R} = \\ &= T_{\text{кр}} \frac{k-1}{k} + \frac{k-1}{2} \zeta T_{\text{кр}} \frac{k-1}{k} = T_{\text{кр}} \frac{k-1}{k} \left( 1 + \frac{k-1}{2} \zeta \right). \end{aligned}$$

Подсчитываем  $T_{\text{мин}}$ :

$$T_{\text{мин}} = 500 \cdot 0,528^{0,2857} \left[ 1 + \frac{1,4-1}{2} (1 - 0,95^2) \right] = 425^\circ \text{К}.$$

Удельный объем

$$v_{\text{мин}} = \frac{RT_{\text{мин}}}{p_{\text{мин}}} = \frac{8314 \cdot 425}{32 \cdot 0,528 \cdot 12 \cdot 10^5} = 0,1743 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Площадь минимального сечения

$$f_{\text{мин}} = \frac{mv_{\text{мин}}}{c_{\text{мин}}} = \frac{3,0 \cdot 0,1743}{370} = 0,001413 \text{ м}^2.$$

Диаметр

$$d_{\text{мин}} = \sqrt{\frac{0,001413}{0,785}} = 0,0424 \text{ м} \approx 42 \text{ мм}.$$

Наконец, рассчитываем длину расширяющейся части:

$$l = \frac{d_2 - d_{\text{мин}}}{2 \operatorname{tg} \gamma/2} = \frac{67 - 42}{2 \cdot 0,0878} = 142 \text{ мм}.$$

11-10. Рассчитать суживающееся сопло. Рабочее тело — азот  $\text{N}_2$ , секундный расход его  $m = 4,2 \text{ кг/сек}$ . Постоянное давление на входе в сопло  $p_1 = 31 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и температура  $t_1 = 627^\circ \text{С}$ . Наружное давление  $p_{\text{ср}} = 0,95 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Коэффициент скорости  $\varphi = 0,96$ .

Найти изменение энтропии азота в процессе необратимого адиабатического расширения, отнесенное к 1 кг текущего газа.

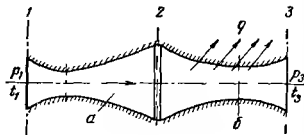
Ответ:  $c_2 = 496 \text{ м/сек}$ ;  $d_2 = 39 \text{ мм}$ ;

$\Delta s = 16,5 \text{ дж/кг} \cdot ^\circ \text{К}$ .

11-11. На рис 11-2 изображен прибор для бескомпрессорного сжатия. Найти теоретическое давление  $p_2$ , до которого будет сжат

Рис. 11-2. К задаче 11-11.

*а* — адиабатическое сверхзвуковое сопло, *б* — сверхзвуковой диффузор с отводом тепла



воздух, выходящий из диффузора, если параметры перед соплом равны  $p_1 = 10 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1 = 250^\circ \text{C}$ . Расширяющаяся часть рассчитана так, что в сечении 2 устанавливается давление  $1 \text{ кг/см}^2$ . Процесс сжатия происходит в диффузоре, причем его можно считать обратным политропическим с показателем политропы  $n = 1.2$ . Процесс расширения изотропический.

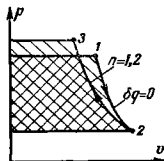


Рис 11-3 К задаче 11-11

Указание. Процессы расширения и сжатия можно представить в  $p-v$  диаграмме (рис 11-3). Вследствие равенства работ площади, ограниченные кривыми процессов, равновесны. Поэтому достаточно аналитически выразить абсолютные значения работ расширения и сжатия, приравнять их друг другу и, пользуясь полученным уравнением, вычислить  $p_3$ .

Ответ:  $p_3 = 13,7 \text{ кг/см}^2$

11-12. Скорость распространения звука в любой непрерывной среде (твердой, жидкой или газообразной) определяется выражением, справедливым при применении системы СИ

$$a = \sqrt{-v^2 \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_s}$$

Считая атмосферный воздух смесью двухатомных идеальных газов, определить скорость распространения звука в нем при давлении  $p = 760 \text{ мм рт. ст}$  и температуре  $t = 20^\circ \text{C}$ .

Ответ:  $a = 343,4 \text{ м/сек}$

11-13. Подсчитать мощность, необходимую на создание в аэродинамической трубе диаметром  $12 \text{ см}$  скорости потока, равной скорости звука при  $10^\circ \text{C}$  и  $0,7 \text{ кг/см}^3$ , считая к п д винтомоторного агрегата равным  $43\%$

Ответ:  $N = 364 \text{ кВт}$

11-14. Определить, насколько температура на поверхности ракеты, движущейся со скоростью  $1000 \text{ м/сек}$ , выше температуры окружающей среды по причине торможения воздуха. Воздух считать идеальным газом, теплоемкость принять постоянной.

Ответ:  $\Delta t = 500^\circ \text{C}$

11-15. Воздух на входе в суживающееся сопло с минимальным сечением  $f_{\text{мин}} = 10 \text{ мм}^2$  имеет параметры  $p_1 = 10 \text{ кг/см}^2$ ,  $t = 300^\circ \text{C}$ . Отношение давлений  $p_{\text{ср}}/p_1 < \beta_{\text{кр}}$ . Как изменится расход, если к суживающемуся соплу присоединить расширяющийся насадок и получить, таким образом, сопло Лавала? Каковому должно быть давление на выходе из этого сопла Лавала, если оно работает в расчетном режиме и если отношение площадей выходного и минимального сечений  $f_2/f_{\text{мин}} = 1,5$ ? Какова скорость истечения из этого сопла? Потерями на трение и величиной входной скорости  $c_1$  пренебречь.

Указание. При истечении из суживающегося сопла на выходе будет звуковая скорость  $c_{\text{кр}}$ , так как  $p_{\text{ср}}/p_1 < \beta_{\text{кр}}$ . Эта же скорость сохранится и в минимальном сечении сопла Лавала, а следовательно, расход через него останется таким же, каков расход че-



Если давление среды продолжает расти, скорость в минимальном сечении оказывается меньшей, чем звуковая, а давление — большим, чем критическое. Все сопло Лавала при этом работает в дозвуковом режиме; расход через него уменьшается по мере роста давления среды.

Для того чтобы решить поставленную задачу, необходимо определить величину давления  $p'_2$ , после чего можно будет судить, будет ли при заданных условиях расход максимальным или меньшим, чем  $m_{\max}$ . Для этого нужно приравнять величину максимального расхода к величине расхода в выходном сечении (на основании уравнения неразрывности), т. е. написать:

$$f_{\min} \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \frac{p_1}{v_1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}} = \\ = f_2 \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left[ \left( \frac{p'_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p'_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}.$$

Из этого соотношения можно определить  $p'_2/p_1 = \beta$ . Возводя левую и правую части в квадрат и сокращая на  $2p_1/v_1$ , получаем:

$$\frac{k-1}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} = \left( \frac{f_2}{f_{\min}} \right)^2 \left( \beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right) = \\ = \left( \frac{f_2}{f_{\min}} \right)^2 \beta^{\frac{2}{k}} \left( 1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right).$$

В этом уравнении  $k=1,4$  и  $f_2/f_{\min}=1,5$ . Уравнение решается подбором или графически. В результате решения получаем:

$$\beta = \frac{p'_2}{p_1} = 0,8806.$$

Таким образом,  $p'_2=0,8806, p_1=8,806 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>. Так как по условию  $p_{ср}=7 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>, заключаем, что в минимальном сечении оказываются звуковая скорость, максимальный расход и  $p_{\min}=p_{кр}$ . На некотором расстоянии от минимального сечения происходит прямой скачок уплотнения, переводящий режим течения из сверхзвукового в дозвуковой<sup>1</sup>.

Изменение давления вдоль сопла качественно может быть описано, например, кривой  $AON_1L_1M_1$ .

<sup>1</sup> Место возникновения скачка, его величину и положение точки  $M$  (т. е. кривую  $OL_1L_2M$ ) мы не определяем. Этими вопросами занимается газовая динамика (см., например, [Л. 1]).

Расход через сопло равен:

$$m = m_{\max} = f_{\min} \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} = 10^{-6} \cdot 0,685 \frac{10^6}{0,1644} = 0,01689 \text{ кг/сек.}$$

Здесь  $v_1 = RT_1/p_1 = 8314 \cdot 573/28,96 \cdot 10^6 = 0,1644 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

11-17. Начальные параметры водяного пара, поступающего к соплам турбины, следующие:  $p_1 = 44,15 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ,  $t_1 = 350^\circ \text{С}$ , давление за соплами  $p_2 = 24,52 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Расход пара составляет  $0,5 \text{ кг/сек}$  на одно сопло.

Определить площадь выходного сечения сопла. Представить процесс расширения в  $i$ -с-диаграмме.

Ответ:  $f_2 = 98 \text{ мм}^2$ .

11-18. Паровая турбина имеет два сопла с выходными сечениями  $f = 4 \text{ см}^2$  каждое. К соплам подводится пар при давлении  $p_1 = 98,1 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и температуре  $t_1 = 500^\circ \text{С}$ .

В результате адиабатического расширения давление падает до  $p_2 = 58,86 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

Определить секундный расход пара и теоретическую мощность, которую можно получить от турбины, пренебрегая трением струи в канале сопла и начальной скоростью.

Ответ:  $m = 2,232 \text{ кг/сек}$  [на одно сопло];

$N = 695 \text{ кВт}$ .

11-19. По трубе течет водяной пар, параметры которого таковы:  $p_1 = 15 \text{ кг/см}^2$ ;  $x_1 = 0,98$ ;  $c_1 = 300 \text{ м/сек}$ .

Найти параметры полного адиабатического торможения потока пара.

Указание. Отложить в  $i$ -с-диаграмме от точки 1 вверх по изотерме величину  $\Delta i = c_1^2/2 \cdot 4186,8 \text{ ккал/кг}$ . Полученная точка соответствует параметрам торможения (рис. 11-5).

Ответ:  $p_0 = 19,0 \text{ кг/см}^2 = 18,6 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ;  
 $t_0 = 208,8^\circ \text{С}$ ;  $c_0 = 668,1 \text{ м/сек}$ ;  $i_0 = 668,1 \text{ ккал/кг} = 2797 \text{ кДж/кг}$ .

11-20. Водяной пар, имея начальную скорость  $c_1 = 200 \text{ м/сек}$  при давлении  $p_1 = 20 \text{ кг/см}^2$  и температуре  $t_1 = 400^\circ \text{С}$ , вытекает через суживающееся сопло в среду с давлением  $p_2 = 6 \text{ кг/см}^2$ .

Определить расход и выходную скорость пара. Площадь выходного сечения принять равной  $1000 \text{ мм}^2$ . Потери на трение пренебречь.

Ответ:  $c_2 = 595 \text{ м/сек}$ ;  $m = 2,4 \text{ кг/сек}$ .

11-21. По трубе течет водяной пар с начальной скоростью  $c_1 = 300 \text{ м/сек}$  при параметрах  $p = 14,9 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$   $t = 300^\circ \text{С}$ .

Определить, насколько действительная температура пара отличается от температуры, фиксируемой термометром, имея в виду, что термометр показывает температуру торможения.

Ответ:  $\Delta t = 20 \text{ град}$ .

11-22. Рассчитать основные размеры сопла Лаваля, если водяной пар с начальным давлением  $p_1 = 20 \text{ кг/см}^2$  и температурой  $t_1 = 350^\circ \text{С}$  адиабатически расширяется до давления  $p_2 = 0,981 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Расход пара составляет  $m = 0,5 \text{ т/ч}$ .

Ответ:  $f_{\min} = 55,9 \text{ мм}^2$ ;  $f_2 = 202 \text{ мм}^2$ ;  $l = 43 \text{ мм}$ .

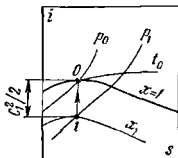


Рис. 11-5. К задаче 11-19.

11-23. Водный пар расширяется в сопле Лавалля от 35 кг/см<sup>2</sup> и 450°С до  $p_2=0,5$  кг/см<sup>2</sup>.

Определить скорость истечения и размеры сопла, если коэффициент потери энергии  $\xi=0,12$ , а расход  $m=0,5$  кг/сек.

### Решение

Определим критическое давление, приняв значение  $\beta_{кр}=0,546$ :

$$p_{кр} = \beta_{кр} p_1 = 0,546 \cdot 35 = 19,11 \text{ кг/см}^2.$$

Считая, что процесс расширения подчиняется уравнению  $pv^k = \text{const}$ , подсчитываем  $k$ , находя удельные объемы  $v_1$  и  $v_{кр}$  по  $i$ -диаграмме:

$$k = \frac{\lg p_1/p_{кр}}{\lg v_{кр}/v_1} = \frac{\lg 35,0/19,11}{\lg 0,15/0,094} = 1,297.$$

Уточним по найденному коэффициенту  $k$  величину  $\beta_{кр}$ :

$$\beta_{кр} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left( \frac{2}{1,297+1} \right)^{1,37} = 0,544.$$

Поскольку уточненное значение критического давления, равное  $0,544 \cdot 35 = 19,04$  кг/см<sup>2</sup>, очень мало отличается от принятого<sup>1</sup>, оставляем значение критического давления  $p_{кр}=19,11$  кг/см<sup>2</sup>.

Предполагая коэффициент скорости  $\varphi$  постоянным вдоль сопла, определим его значение:

$$\varphi = \sqrt{1 - \xi} = \sqrt{1 - 0,12} = 0,938.$$

При истечении с трением критическая скорость потока достигается не в минимальном сечении сопла, а в начальной части расширяющегося насадка. Заданный расход пара ограничивается минимальным сечением, давление в этом сечении считаем с весьма малой погрешностью равным давлению в минимальном сечении при истечении без трения (см. задачу 11-9), т. е.  $p_{мин} = p_{кр}$ .

Действительную скорость пара в рассматриваемом сечении определим из уравнения

$$c_{мин,д} = 91,53 \varphi \sqrt{i_1 - i_{кр}} = 91,53 \cdot 0,938 \cdot \sqrt{797 - 753} = 569 \text{ м/сек.}$$

Площадь минимального сечения  $f_{мин} = mv_{мин}/c_{мин,д}$ , где  $c_{мин,д}$  — действительная скорость, а  $v_{мин}$  — удельный объем пара в минимальном сечении. Для того чтобы найти его значение, следует в  $i$ -с-диаграмме отложить точки, соответствующие действительному (с учетом трения) состоянию пара. Найдем энтальпии в минимальном и выходном сечениях:

$$i_{мин} = i_{кр} + \xi(i_1 - i_{кр}) = 753 + 0,12(797 - 753) = 758 \text{ ккал/кг};$$

$$i_{2д} = i_2 + \xi(i_1 - i_2) = 582 + 0,12(797 - 582) = 608 \text{ ккал/кг.}$$

<sup>1</sup> В противном случае задачу следует решать методом последовательного приближения.

Отложив на изобарах  $p=p_{кр}$  и  $p_2$  полученные энthalпий, зафиксируем искомые точки и найдем, что  $v_{мин}=0,153 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_{2к}=3,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Площадь минимального сечения

$$f_{мин} = \frac{0,5 \cdot 0,153}{569} = 0,000134 \text{ м}^2.$$

Выходная скорость

$$c_{2к} = 91,53 \sqrt{i_1 - i_2} = 91,53 \sqrt{i_1 - i_{2к}} = 91,53 \sqrt{797 - 608} = 1260 \text{ м/сек}.$$

Площадь выходного сечения

$$f_2 = \frac{0,5 \cdot 3,2}{1260} = 0,001270 \text{ м}^2.$$

Если расширяющийся насадок имеет форму прямого конуса, то

$$d_{мин} = \sqrt{\frac{f_{мин}}{0,785}} = \sqrt{\frac{134}{0,785}} = 13,1 \text{ мм};$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{f_2}{0,785}} = \sqrt{\frac{1270}{0,785}} = 40,2 \text{ мм},$$

считая угол конусности  $\gamma = 12^\circ$ , находим длину расширяющейся части сопла:

$$l = \frac{d_2 - d_{мин}}{2 \operatorname{tg} \gamma/2} = \frac{40,2 - 13,1}{2 \cdot 0,105} = 129 \text{ мм}.$$

**11-24.** Определить скорость струи пара на выходе из сопла Лавалля и потерю кинетической энергии вследствие трения, если состояние пара на входе в сопло определяется давлением  $p_1 = 58,89 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и температурой  $t_1 = 450^\circ \text{С}$ . Давление на выходе из сопла  $p_2 = 11,77 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Скоростной коэффициент сопла  $\varphi = 0,95$ . Входную скорость не учитывать. Представить процесс расширения в  $i$ -диатрамме.

**Ответ:**  $c_{2к} = 830 \text{ м/сек}$ ;  $h_{тр} = 9,1 \text{ ккал/кг}$ .

**11-25.** Пар при начальных параметрах  $p_1 = 130 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1 = 580^\circ \text{С}$  вытекает из расширяющегося сопла в среду с давлением  $p_{ср} = 1 \text{ кг/см}^2$ . Площадь минимального сечения  $f_{мин} = 3 \text{ см}^2$ .

Определить секундный расход пара, скорость истечения и площадь выходного сечения сопла. Потерями в сопле и начальной скоростью пренебречь.

Задачу решить, сравнивая критическую скорость с местной скоростью звука.

### Решение

Отношение давлений  $\beta = p_{ср}/p_1 = 1/130 < \beta_{кр} \approx 0,55$ , поэтому при расчетном режиме в расширяющейся части поток будет сверхзвуковым, а в минимальном сечении окажется критическая скорость



$$c_{кр} = \sqrt{2(i_1 - i_{кр})} - 1,414 \sqrt{i_1 - i_{кр}}, \text{ м/сек},$$

если  $[i] = \text{дж/кг}$  или

$$c_{кр} = \sqrt{2g427(i_1 - i_{кр})} = 91,53 \sqrt{i_1 - i_{кр}}, \text{ м/сек},$$

если  $[i] = \text{ккал/кг}$ .

Эта скорость равна местной скорости звука, которая в самом общем случае должна быть подсчитана по формуле

$$a_* = \sqrt{-v^2 (\partial p / \partial v)_s}, \text{ м/сек},$$

если  $[p] = \text{н/м}^2$ , или

$$a_* = \sqrt{-gv^2 (\partial p / \partial v)_s}, \text{ м/сек},$$

если  $[p] = \text{кг/м}^2$ .

Для нахождения параметров в минимальном сечении („критических“) нужно, следовательно, приравнять  $c_{кр} = a_*$  и привести к тождеству выражение

$$91,53 \sqrt{i_1 - i_{кр}} = \sqrt{-gv^2 (\partial p / \partial v)_s}.$$

Эту задачу можно выполнить, пользуясь таблицами свойств водяного пара, заменяя  $(\partial p / \partial v)_s \approx (\Delta p / \Delta v)_s$ , т. е. через первые табличные разности при постоянной энтропии.

По таблицам [Л. 4] находим значения  $s_1 = 1,6027 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{К}$  и  $i_1 = 847,5 \text{ ккал/кг}$  и затем составляем расчетную таблицу ( $c$ ;  $a_*$ ) =  $= f(p)$ . Пределы для давления выбираем в небольшой окрестности  $p_{кр} \approx 0,55 \cdot 130 = 71 \text{ кг/см}^2$ .

При составлении таблицы величины  $v$  и  $i$  находим, линейно интерполируя при  $s = 1,6027 = \text{const}$ .

| $\frac{p \cdot 10^{-4}}{\text{кг/м}^2}$                          | $v, \text{ м}^3/\text{кг}$ | $i, \text{ ккал/кг}$ | $(\Delta p / \Delta v)_s \cdot 10^{-4}$ | $a_*, \text{ м/сек}$ | $c, \text{ м/сек}$ |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------------------------|----------------------|--------------------|
| $s = 1,6027 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{К} = \text{const}$ |                            |                      |                                         |                      |                    |
| 62                                                               | 0,05147                    | 788,0                | —                                       | —                    | —                  |
| 64                                                               | 0,05021                    | 790,6                | —1,588                                  | 627                  | 691                |
| 66                                                               | 0,04901                    | 792,8                | —1,667                                  | 627                  | 676                |
| 68                                                               | 0,04789                    | 795,2                | —1,787                                  | 634                  | 662                |
| 70                                                               | 0,04681                    | 797,3                | —1,851                                  | 631                  | 649                |
| 72                                                               | 0,04580                    | 799,5                | —1,981                                  | 635                  | 634                |
| 74                                                               | 0,04482                    | 801,7                | —2,041                                  | 634                  | 620                |
| 76                                                               | 0,04387                    | 803,5                | —2,105                                  | 630                  | 607                |
| 78                                                               | 0,04301                    | 805,7                | —2,326                                  | 650                  | 591                |
| 80                                                               | 0,04215                    | 807,6                | —2,326                                  | 637                  | —                  |
| 82                                                               | 0,04135                    | —                    | —2,488                                  | 646                  | —                  |

Далее строим графики  $(c; a_*) = f(p)$ , представленные на рис. 11-6\*. Очевидно, что пересечение кривых дает положение критической точки, для которой оказывается:

$$p_{кр} = 71,7 \text{ кг/см}^2; c_{кр} = 636 \text{ м/сек.}$$

Дальнейшее решение задачи проводится обычным порядком. Удельный объем в минимальном сечении находится из составленной нами таблицы, величины  $i_2$  и  $v_2$  подсчитываются при помощи таблиц водяного пара при  $s = 1,6027 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{К}$  (или находятся по  $i$ -с-диаграмме).

Приводим ответ:  $c_2 = 1496 \text{ м/сек.}$ ;  $m = 4,152 \text{ кг/сек.}$ ;  $i_2 = 11,6 \text{ см}^2$ .

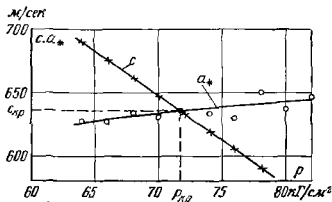


Рис 11-6. К задаче 11-25

11-26. С целью регулирования мощности турбин применяется дросселирование пара, приводящее к потере работоспособности. Построить график зависимости удельной полезной работы турбины от давления  $p_1$  перед соплом турбины, приняв  $p_1 = 20, 18, 16, 14, 12$  и  $10 \text{ кг/см}^2$ . Начальные параметры пара  $p_1 = 24 \text{ кг/см}^2$ ;  $t_1 = 340^\circ\text{С}$ . Пар адиабатически расширяется до  $p_2 = 0,05 \text{ кг/см}^2$ .

11-27. Водяной пар проходит через дроссельный вентиль, где дросселируется от давления  $p_1 = 98,1 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1 = 350^\circ\text{С}$  до  $p_2 = 0,981 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Скорость пара на выходе из дросселя равна  $250 \text{ м/сек}$ . Определить температуру выходящего пара. Начальной скоростью пара пренебречь.

Ответ:  $t_2 = 214^\circ\text{С}$ .

11-28. Горячая вода подается с ТЭЦ заводу по трубам С ТЭЦ выходит вода при температуре  $t_1 = 120^\circ\text{С}$  и давлении  $p_1 = 10 \text{ кг/см}^2$ ; к потребителю поступает вода при давлении  $p_2 = 3 \text{ кг/см}^2$ .

Определить температуру воды (при отсутствии теплообмена).

Ответ: Температура воды, поступающей к потребителю, равна  $120,09^\circ\text{С}$ .

11-29. Насыщенный водяной пар при начальном давлении  $p_1 = 20 \text{ кг/см}^2$  и  $x_1 = 0,9$  дросселируется до  $p_2 = 6 \text{ кг/см}^2$ .

Определить изменение температуры и степени сухости пара, пользуясь таблицами водяного пара.

Ответ:  $\Delta t = 53,3^\circ\text{С}$ . Степень сухости повысится до  $0,93$ .

\* Разбег точек кривой  $a_* = f(p)$  объясняется некоторой негладкостью таблиц водяного пара.

11-30. Водяной пар при давлении  $p_1=180 \text{ кг/см}^2$  и температуре  $t_1=370^\circ \text{C}$  дросселируется до  $p_2=86 \text{ кг/см}^2$

Определить конечное состояние пара, пользуясь таблицами воды и водяного пара

Какое будет конечное состояние пара, если дросселирование производить до давлений 9 и  $1.2 \text{ кг/см}^2$ ?

Ответ: При  $p_2=86 \text{ кг/см}^2$  пар становится влажным со степенью сухости  $x_1=0.969$ . Дросселирование до  $9 \text{ кг/см}^2$  почти не изменит степень сухости

$x_2=0.965$ . Дальнейшее дросселирование до  $p_2=1.2 \text{ кг/см}^2$  переведет пар снова в перегретое состояние с температурой  $t'_2=104.5^\circ \text{C}$

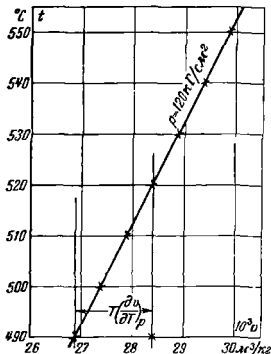


Рис 11-7 К задаче 11-33

11-31. Определить интегральный дроссель эффект и изменение энтропии, если водяной пар, имеющий параметры  $t_1=400^\circ \text{C}$  и  $p_1=80 \text{ кг/см}^2$ , дросселируется до давления  $p_2=50 \text{ кг/см}^2$ . Решить задачу, пользуясь  $ts$  диаграммой

Ответ:  $\Delta t=22^\circ \text{C}$ ,  $\Delta s=0.048 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ \text{K}$

11-32. Водяной пар при  $t_1=400^\circ \text{C}$  и  $p_1=80 \text{ кг/см}^2$  дросселируется до  $p_2=45 \text{ кг/см}^2$

Определить интегральный дроссель эффект и изменение энтропии, пользуясь диаграммой  $ts$ . Проверить полученный результат по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара

Ответ:  $\Delta t \approx 26.3^\circ \text{C}$ ,  $\Delta s \approx 0.057 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ \text{K}$

11-33. Теплоемкость водяного пара при  $p=120 \text{ кг/см}^2$  и  $t=520^\circ \text{C}$  равна  $c_p=0.630 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$ . Зависимость удельного объема от температуры при давлении  $120 \text{ кг/см}^2$  по таблицам водяного пара выражается следующими данными

| $t, ^\circ \text{C}$      | 490    | 500    | 510    | 520    | 530    | 540    | 550    |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $v, \text{м}^3/\text{кг}$ | 0.0269 | 0.0274 | 0.0279 | 0.0284 | 0.0289 | 0.0294 | 0.0299 |

Определить дифференциальный адиабатический дроссель-эффект при  $t=520^\circ \text{C}$ .

### Решение

Пользуясь приведенной в условии задачи таблицей, строим в  $tv$ -координатах изобару  $p=120 \text{ кг/см}^2$  и графически дифференцированием определяем производную  $(dv/dT)_p$  при температуре  $520^\circ \text{C}$  (см рис. 11-7)

В соответствии с уравнением адиабатического дроссель эффекта

$$\alpha_1 = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_t = \frac{[T(\partial v / \partial T)_p - v]}{c_p}$$

получаем:

$$\alpha_1 = \frac{\left( 793 \frac{0,0015}{30} - 0,0284 \right) \cdot 10^4}{427 \cdot 0,630} = 0,420 \frac{\text{град}}{\text{кг/см}^2}.$$

11-34. Пользуясь полученной в предыдущей задаче величиной дроссель эффекта  $\alpha_1 = 0,420$  при  $t = -520^\circ \text{C}$ , определить интегральный дроссель эффект при падении давления пара от  $p_1 = 120$  до  $p_2 = 100 \text{ кг/см}^2$ . Результат расчета сравнить с табличной величиной

Ответ:  $\Delta t = 840^\circ \text{C}$ , по таблицам водяного пара  $\Delta t = 9^\circ \text{C}$

11-35. С помощью таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара определить точку инверсии для воды при температуре  $270^\circ \text{C}$ .

### Решение

В точке инверсии коэффициент дифференциального дроссель-эффекта равняется нулю

$$\alpha_1 = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_t = \frac{[T(\partial v / \partial T)_p - v]}{c_p} = 0.$$

Это уравнение можно записать следующим образом:

$$\alpha_1 = \frac{-(di/dp)_T}{c_p} = 0.$$

Для равенства нулю коэффициента дроссель-эффекта нужно, чтобы производная  $(di/dp)_T = 0$  при заданной температуре  $270^\circ \text{C}$ . Воспользовавшись таблицами воды и водяного пара, составим таблицу значений энтальпии для различных давлений при температуре  $270^\circ \text{C}$

|                                 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $p_{\text{ср}}, \text{кг/см}^2$ | 112,5 | 137,5 | 160   | 182,5 | 237,5 | 297,5 | 340   | 375   | 395   |
| $i, \text{ккал/кг}$             | 282,6 | 282,5 | 282,4 | 282,3 | 282,2 | 282,3 | 282,4 | 282,5 | 282,6 |

Очевидно, что при давлении (среднем)  $237,5 \text{ кг/см}^2$  знак приращения энтальпии изменяется на обратный, производная  $(di/dp)_T$  в этой точке равна нулю. Следовательно, при температуре  $270^\circ \text{C}$  давление в точке инверсии  $p_i = 237,5 \text{ кг/см}^2$ .

11-36. По паропроводу 1 (рис. 11-8) течет перегретый пар с параметрами  $p_1 = 100 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1 = 450^\circ \text{C}$ . Расход его  $m_1 = 860 \text{ кг/ч}$ . Для того чтобы снизить температуру пара, к паропроводу 1 присоединили другой паропровод 2, по которому подают  $m_2 = 620 \text{ кг/ч}$  влажного пара при давлении  $p_2 = 70 \text{ кг/см}^2$  и со степенью сухости  $x_2 = 0,89$ . Заданная температура смеси  $t_{\text{см}} = 345^\circ \text{C}$ .

Найти давление смеси и ее энтальпию. Величинами кинетических энергий потоков пренебречь. При решении воспользоваться *is*-диаграммой.

Ответ:  $p_{см} = 80 \text{ кг/см}^2$ ;  $i_{см} = 710 \text{ ккал/кг}$ .

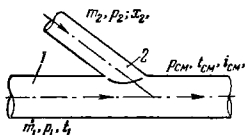


Рис. 11-8. К задаче 11-36.

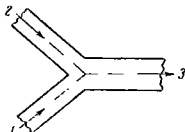


Рис. 11-9. К задаче 11-37.

11-37. Смешиваются два потока пара: параметры указаны на схеме рис 11-9

Определить температуру выходящего пара и его энтальпию. Величинами кинетических энергий потоков пренебречь. Для решения воспользоваться *is* диаграммой

Ответ:  $t_{см} = 366^\circ \text{С}$ ;  $i_{см} = 763 \text{ ккал/кг}$ .

1 —  $p_1 = 15 \text{ кг/см}^2$ ;  $t_1 = 400^\circ \text{С}$ ;  $m = 4 \text{ кг}$ ; 2 —  $p_2 = 10 \text{ кг/см}^2$ ;  $t_2 = 300^\circ \text{С}$ ;  $m = 10 \text{ кг}$ ; 3 —  $p_3 = 8 \text{ кг/см}^2$ .

## 12. КОМПРЕССОРЫ И ЦИКЛЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

12-1. Идеальный поршневой компрессор сжимает  $450 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха от  $p_1 = 0,98 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1 = 30^\circ \text{С}$  до  $p_2 = 4,9 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$

Определить мощность, затрачиваемую на привод компрессора, если сжатие происходит адиабатически, и температуру газа на выходе из компрессора

Ответ:  $N = 28,5 \text{ кВт}$ ;  $t = 207^\circ \text{С}$

12-2. Компрессор сжимает  $600 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха от давления  $p_1 = 0,98 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  до  $p_2 = 6,38 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

Определить мощность, необходимую на привод компрессора, если сжатие происходит: а) адиабатически, б) политропически с показателем  $n = 1,3$ , в) изотермически.

Ответ:  $N_{ад} = 40,6 \text{ кВт}$ ;  $N_{пол} = 38,3 \text{ кВт}$ ;  $N_{из} = 30,5 \text{ кВт}$ .

12-3. Многоступенчатый поршневой компрессор без вредного объема сжимает воздух от начального давления  $p_1 = 0,981 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  до давления  $p_2 = 53,95 \text{ н/м}^2$ . Известно, что отношение конечного давления к начальному одинаково для всех цилиндров и заключено в пределах 6—8.

Определить число ступеней в компрессоре, мощность двигателя, если к. п. д. ступени равен 0,7, и расход охлаждающей воды при увеличении ее температуры на  $15^\circ \text{С}$ . Известно, что начальная температура воздуха равна  $t_1 = 17^\circ \text{С}$ , а сжатие политропическое с показателем политропы  $n = 1,3$ . Производительность компрессора  $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Ответ:  $N = 65,3 \text{ кВт}$ ;  $m = 500 \text{ кг/ч}$ ; число ступеней равно двум.

12-4. Двухступенчатый поршневой компрессор сжимает воздух от давления  $p_1 = 0,981 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  до давления  $p_2 = 58,8 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Сжатие политропическое с показателем политропы  $n = 1,25$ .

Начальная температура воздуха  $t_1 = 20^\circ \text{С}$ , производительность компрессора  $500 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Определить расход охлаждающей воды на охлаждение цилиндров и промежуточного холодильника, если ее температура возрастает от  $10$  до  $30^\circ \text{С}$ , а также мощность двигателя на привод компрессора, если  $\eta_k = 0,65$ . Компрессор без вредного объема.

Ответ:  $N = 58,7 \text{ кВт}$ ;  $m = 2390 \text{ кг/ч}$ .

12-5. В двухступенчатом компрессоре без вредного объема воздух адиабатически сжимается от  $0,98 \cdot 10^5$  до  $49 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

Определить производительность компрессора, если мощность его двигателя  $60 \text{ кВт}$ , к. п. д. компрессора  $\eta_k = 0,65$ . Начальная температура воздуха равна  $27^\circ \text{С}$ .

Ответ:  $239,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

12-6. В изотермическом компрессоре воздух сжимается от  $0,98 \cdot 10^5$  до  $9,8 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Как изменится мощность двигателя для привода компрессора, если сжатие будет производиться изотермически до  $980 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ?

Ответ: В 3 раза.

12-7. Определить объемную часовую производительность по сжатому воздуху компрессора, сжимающего воздух от  $p_1 = 0,98 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1 = 15^\circ \text{С}$  до  $p_2 = 7,84 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Сжатие изотермическое, мощность двигателя  $40 \text{ кВт}$ .

Ответ:  $V = 88,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

12-8. В результате уменьшения расхода воды, охлаждающей цилиндр компрессора, температура сжатого воздуха на выходе из компрессора возрастает от  $100$  до  $150^\circ \text{С}$ . Начальная температура воздуха остается постоянной и равной  $17^\circ \text{С}$ . Давление сжатого воздуха  $p_2 = 4,5 \text{ кг/см}^2$ , начальное давление  $p_1 = 1 \text{ кг/см}^2$ .

Как изменится затрачиваемая мощность?

Ответ: Приблизительно на 6%.

12-9. Начальные параметры воздуха, поступающего в поршневой компрессор, равны

$$p_1 = 1 \text{ кг/см}^2, t_1 = 27^\circ \text{С}.$$

Сколько ступеней должен иметь компрессор, чтобы при адиабатическом сжатии максимальная температура воздуха в каждой ступени не превышала  $150^\circ \text{С}$ . Давление нагнетаемого воздуха должно быть равно

$$206,01 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2.$$

Ответ: Число ступеней равно пяти.

12-10. Кислородный компрессор сжимает кислород от  $p = 0,98 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1 = 17^\circ \text{С}$  до давления  $3,43 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

Определить необходимую мощность двигателя, если адиабатический к. п. д. установки  $\eta_{ад} = 0,83$ . Производительность компрессора  $200 \text{ м}^3/\text{ч}$  сжатого газа.

Ответ:  $N = 23,4 \text{ кВт}$ .

12-11. Определить экономию в работе, полученную за счет перехода от одноступенчатого к двухступенчатому адиабатическому сжатию воздуха в поршневом компрессоре без вредного объема. Начальное давление  $p_1 = 0,98 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ , температура  $t_1 = 17^\circ \text{С}$ . Конечное давление  $p_2 = 9,8 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

Ответ: 16,5%.

12-12. Определить предельное давление (в долях от начального), при котором производительность одноступенчатого компрессора, сжимающего воздух, становится равной нулю. Объем вредного пространства составляет 2, 4 и 6% от части объема цилиндра, соответствующей ходу поршня. Сжатие адиабатическое.

Ответ: 1) 246  $p_1$ , 2) 95,6  $p_1$ ; 3) 55,7  $p_1$ .

12-13. Рассчитать эффективную мощность на валу поршневого одноступенчатого всасываемого компрессора, сжимающего кислород. Параметры среды, из которой всасывается газ:  $p_1 = 0,981 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1 = 20^\circ \text{С}$ . Степень повышения давления  $\beta = p_2/p_1 = 7$ . Эффективный к.п.д.  $\eta_k = 0,7$ . Длина цилиндра  $h_c = 250 \text{ мм}$ ; ход поршня  $h = 240 \text{ мм}$ , диаметр цилиндра  $d = 120 \text{ мм}$ . Вал компрессора совершает 240 об/мин. Считать, что коэффициент наполнения цилиндра  $\lambda$  равен объемному коэффициенту  $\lambda_v$ , т.е. считать, что параметры всасываемого газа равны параметрам среды, а утечки отсутствуют.

### Решение

Эффективную мощность в общем виде следует записать так:

$$N_e = \frac{N, \text{ дж/мин}}{60\eta_k} = \frac{m_{\text{мин}} l_k}{60\eta_k}, \text{ вт.}$$

Здесь  $m_{\text{мин}}$  — масса газа, всасываемая за 1 мин, кг/мин;

$l_k$  — не зависящая от вредного объема теоретическая работа, отнесенная к 1 кг рабочего тела, дж/кг.

Величину  $m_{\text{мин}}$  можно выразить следующим образом:

$$m_{\text{мин}} = \lambda V_h n \frac{p_1}{RT_1},$$

где  $\lambda = \lambda_v = (V - V_0)/V_h$  (см. рис. 12-1);  $V_h$ ,  $\text{м}^3/\text{об}$  — объем, соответствующий ходу поршня,  $V_0$ ,  $\text{м}^3/\text{об}$  — объем расширившегося к моменту начала всасывания газа, находящегося во вредном объеме. Величина  $V_0$  подсчитывается по формуле

$$V_0 = V_{\text{вр}} \beta^{\frac{1}{k}}.$$

После подстановки этих величин в основную формулу получаем:

$$N_e = \frac{1}{60\eta_k} \lambda V_h n p_1 \frac{k}{k-1} \left( \beta^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right), \text{ вт.}$$

По линейным размерам определяем объемы:  $V = \pi d^2/4 h_n = 0,00282 \text{ м}^3$ ;  $V_h = \pi d^2/4 h = 0,00271 \text{ м}^3$ ;  $V_{\text{вр}} = V - V_h = 0,00011 \text{ м}^3$ .

Находим величину  $V_0 = V_{\text{вр}} \beta^{1/k} = 0,00011 \cdot 7^{1/1,4} = 0,00044 \text{ м}^3$ .

Следовательно,  $\lambda = \lambda_v = (0,00282 - 0,00044) : 0,00271 = 0,878$ .

Рассчитываем мощность:

$$N_e = \frac{1}{60 \cdot 0,7} 0,878 \cdot 0,00271 \cdot 240 \cdot 0,981 \cdot 10^6 \frac{1,4}{1,4-1} \cdot \left( 7^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right) = \\ \approx 3474 \text{ вт} \approx 3,5 \text{ кВт.}$$

12-14. Определить часовую производительность одноступенчатого неохлаждаемого компрессора в  $\text{м}^3/\text{ч}$ , а также полный объем

цилиндра  $V$ , если известно: параметры всасываемого воздуха  $p_1 = 0,98 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1 = 20^\circ \text{С}$ ; степень повышения давления  $\beta = 8$ ; эффективный к.п.д.  $\eta_k = 0,68$ , число оборотов вала  $n = 300 \text{ об/мин}$ ; коэффициент наполнения, равный объемному коэффициенту  $\lambda = \lambda_v = 0,883$ ; мощность на валу компрессора  $N_e = 52 \text{ кВт}$ .

Ответ:  $412 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $V = 29,7 \text{ дм}^3$

12-15. Начальное состояние воздуха, поступающего в воздушный двигатель, характеризуется параметрами:  $p_1 = 11,76 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1 = 157^\circ \text{С}$ . Расширение в цилиндре двигателя происходит по политропе с показателем  $n = 1,3$ .

Определить часовой расход сжатого воздуха, если мощность двигателя  $N = 300 \text{ л. с.}$

Ответ:  $m = 3430 \text{ кг/ч}$ .

12-16. Воздушный двигатель, использующий для работы сжатый воздух, должен развивать мощность  $N = 30 \text{ кВт}$ .

Каков часовой расход сжатого воздуха, если начальные параметры его  $p_1 = 19,6 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ,  $t_1 = 30^\circ \text{С}$ ? Давление в конце адиабатического расширения  $p_2 = 0,98 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$

Ответ:  $m = 612 \text{ кг/ч}$

12-17. Определить характер зависимости термического к.п.д. от степени сжатия  $\epsilon$  для цикла шпоршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом тепла при  $v = \text{const}$ , изменяя  $\epsilon$  от 3 до 9. Показатель политропы  $n = 1,3$ .

12-18. Рассчитать полезную работу, совершенную за цикл с подводом тепла в процессе  $v = \text{const}$ , если известно, что расход топлива составляет  $44 \text{ г}$  на  $1 \text{ кг}$  воздуха,  $\epsilon = 6$ , теплота сгорания топлива  $Q_n^p = 29260 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$ ,  $k = 1,37$ .

Ответ:  $l = 620 \text{ кДж/кг}$ .

12-19. Двигатель работает по циклу с подводом тепла в процессе  $v = \text{const}$ . Начальное состояние рабочего тела:  $p_1 = 0,9 \text{ кг/см}^2$ ,  $t_1 = 20^\circ \text{С}$ , степень сжатия  $\epsilon = 4,6$ . При сгорании топлива выделяется энергия в количестве  $1287 \text{ кДж/кг}$ .

Определить  $\eta_i$  и мощность одного цилиндра двигателя, если диаметр цилиндра  $d = 250 \text{ мм}$ ; ход поршня  $h = 340 \text{ мм}$ , число оборо-

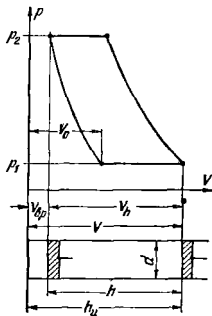


Рис. 12-1 К задаче 12-13.



тов  $n=200$  об/мин; за каждые два оборота совершается один цикл. Считать, что рабочее тело обладает свойствами воздуха.

Ответ:  $\eta_c=0,457$ ;  $N=17,3$  кВт.

12-20. Для цикла с подводом тепла в процессе  $v=\text{const}$  определить среднее индикаторное (цикловое) давление. Начальное давление  $p_1=1$  кг/см<sup>2</sup>;  $t_1=20^\circ\text{C}$ ;  $\epsilon=3,6$ ;  $\lambda=p_3/p_2=3,33$ .

Ответ:  $p_i=5,4$  кг/см<sup>2</sup> $=5,26 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>.

12-21. Мощность четырехтактного двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу с подводом тепла в процессе  $p=\text{const}$ , равна 20 л. с. Диаметр цилиндра  $d=240$  мм, ход поршня  $h=340$  мм, число оборотов  $n=200$  об/мин.

Определить среднее индикаторное давление.

Ответ:  $p_i=5,64 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>.

12-22. Для цикла с подводом тепла в процессе  $p=\text{const}$  определить полезную работу и термический к. п. д., если  $p_1=1$  кг/см<sup>2</sup>;  $t_1=50^\circ\text{C}$ ;  $\epsilon=14$ ;  $k=1,4$ ;  $p=1,67$ . Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

Ответ:  $\eta_t=0,608$ ;  $l=376$  кдж/кг.

12-23. Известно, что в цикле с подводом тепла в процессе  $p=\text{const}$  при начальных параметрах  $p_1=0,833 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup> и  $t_1=25^\circ\text{C}$  подведенное тепло составляет 773,3 кдж/кг;  $\epsilon=14$ .

Требуется определить термический к. п. д. и полезную работу за цикл, отнесенную к 1 кг рабочего тела. Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

Ответ:  $\eta_t=0,60$ ;  $l=464$  кдж/кг.

12-24. Для цикла Дизеля, рабочее тело которого обладает свойствами воздуха, заданы температуры, соответствующие следующим точкам цикла:  $t_1=40^\circ\text{C}$ ;  $t_2=600^\circ\text{C}$ ;  $t_4=270^\circ\text{C}$ .

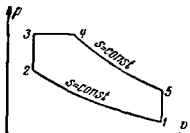
Определить термический к. п. д. и сравнить его с термическим к. п. д. цикла Карно в том же интервале температур.

Ответ:  $\eta_{t,к}=0,61$ ;  $\eta_{t,Д}=0,76$ .

12-25. В цикле поршневого двигателя внутреннего сгорания с комбинированным подводом тепла (рис. 12-2) начальное давление  $p_1=0,85$  кг/см<sup>2</sup> и температура  $t_1=50^\circ\text{C}$ . Степень сжатия  $\epsilon=8$ ;  $\lambda=2,0$  и  $p=1,2$ .

Определить параметры в характерных для цикла точках, количество подведенного тепла, полезную работу и термический к. п. д. цикла. Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

Ответ: Параметры характерных точек:



|   | $p, \text{кг/см}^2$ | $v, \text{м}^3/\text{кг}$ | $T, ^\circ\text{K}$ |
|---|---------------------|---------------------------|---------------------|
| 1 | 0,85                | 1,11                      | 323                 |
| 2 | 15,5                | 0,141                     | 745                 |
| 3 | 31,0                | 0,141                     | 1490                |
| 4 | 31,0                | 0,169                     | 1790                |
| 5 | 2,22                | 1,11                      | 841                 |

Рис. 12-2. К задаче 12-25.

$$\eta_t = 0,55; q_1 = 199 \text{ ккал/кг};$$

$$l = 47300 \text{ кг} \cdot \text{м/кг}.$$

12-26. Для цикла двигателя внутреннего сгорания с комбинированным подводом тепла расход топлива составляет 0,035 кг на 1 кг рабочего тела. Начальные параметры:  $p_1=0,882 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>,  $t_1=50^\circ\text{C}$ . Степень сжатия  $\epsilon=9$ . Максимальное давление в цикле  $29,4 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>.

Определить термический к. п. д. и долю тепла топлива, подведенного в процессе  $p = \text{const}$ . Теплота сгорания топлива  $Q_H^p = 29\,260 \text{ кДж/кг}$ . Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

Ответ:  $\eta_t = 58,9\%$ ;  $q_p/q_1 = 56\%$ .

12-27. Определить среднюю температуру выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу с подводом тепла при  $v = \text{const}$ , если параметры рабочего тела на входе в цилиндр  $p_1 = 0,97 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1 = 50^\circ \text{C}$ , а степень сжатия  $\varepsilon = 6$ . В процессе подвода тепла рабочему телу сообщается  $q_v = 920 \text{ кДж/кг}$  тепла. Рабочее тело обладает свойствами воздуха. Теплоемкость считать не зависящей от температуры.

### Решение

Цикл изображен в  $p$ - и  $T$ - $s$ -координатах на рис. 12-3. Как известно, процесс 4-1 в цикле 1234, в котором тепло отводится нижнему источнику, является условным. В действительности его следует заменить двумя процессами: 4-в и в-1. Первый из них является необратимым процессом истечения отработавших в цилиндре газов через выхлопной клапан в окружающую среду с давлением  $p_n$  (этот процесс можно считать необратимым адиабатическим) и второй — изобарическое охлаждение газов от искомой  $t_n$  до температуры среды. В курсах технической термодинамики доказывается, что процесс 1-4 термодинамически эквивалентен процессам 4-в и в-1.

Искомую температуру можно найти, записав уравнение первого закона термодинамики для процесса 4-в:

$$u_4 - u_v - p_n (v_v - v_4).$$

В правой части этого уравнения записана работа газа против постоянного давления внешней среды  $p_n$ .

Записав левую часть как  $c_v(T_4 - T_v)$ , где  $c_v = \frac{R}{k-1}$  и заметив, что  $p_v = p_1$  и  $v_4 = v_1$ , путем несложных преобразований можно прийти к следующему выражению:

$$T_v = \frac{T_4}{k} \left[ 1 + (k-1) \frac{T_1}{T_4} \right].$$

Предоставляем возможность учащимся сделать эти преобразования самостоятельно.

Температура  $T_4$  находится путем расчета обратимого цикла 1234 обычным порядком. В результате расчета получается:

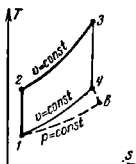
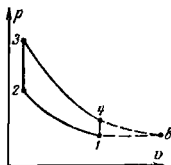


Рис. 12-3. К задаче 12-27.

$T_4 = 948^\circ \text{K}$  Следовательно,

$$T_b = \frac{948}{1,4} \left[ 1 + (1,4 - 1) \frac{323}{948} \right] = 769^\circ \text{K}; t_b = 496^\circ \text{C}.$$

Как видно,  $T_b$  значительно ниже, чем температура  $T_4$  в конце адиабатического расширения газов в цилиндре.

### 13. ЦИКЛЫ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК И РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

При решении задач этого раздела считать, что рабочее тело обладает свойствами идеального газа.

**13-1.** Рассчитать термический к. п. д. простейшей газотурбинной установки, работающей по циклу с подводом тепла при  $p = \text{const}$  при следующих степенях повышения давления

1)  $\beta_1 = 5$ ; 2)  $\beta_2 = 10$ ; 3)  $\beta_3 = 20$ .

Считать, что рабочее тело обладает свойствами воздуха. Показатель адиабаты принять равным  $k = 1,4$ .

**Ответ:**  $\eta_{t,1} = 0,369$ ;  $\eta_{t,2} = 0,482$ ;  $\eta_{t,3} = 0,575$ .

**13-2.** Газотурбинная установка работает по циклу с подводом тепла при  $p = \text{const}$ . Степень повышения давления равна  $\beta = 12$ .

Рассчитать термический к. п. д. ГТУ для двух случаев: а) рабочим веществом является воздух; б) рабочим веществом является гелий.

**Ответ:** Для воздуха  $\eta_t = 0,508$ ; для гелия  $\eta_t = 0,630$ .

**13-3.** Компрессор газотурбинной установки сжимает воздух с начальными параметрами  $p_1 = 10^5 \text{ н/м}^2$  и  $t_1 = 5^\circ \text{C}$  до давления  $p_2 = 8 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Внутренний относительный к. п. д. компрессора равен 0,84.

Определить температуру воздуха на выходе из компрессора, а также мощность привода компрессора  $N_k$ , если известно, что компрессор должен подавать  $10^6 \text{ кг/ч}$  воздуха.

**Ответ:**  $t_2 = 274^\circ \text{C}$ ;  $N_k = 7500 \text{ кВт}$ .

**13-4.** В турбину газотурбинной установки входит гелий с параметрами  $p_3 = 10^6 \text{ н/м}^2$ ,  $t_3 = 700^\circ \text{C}$ . Внутренний относительный к. п. д. турбины равен 0,86, давление за турбиной  $p_4 = 10^5 \text{ н/м}^2$ .

Определить температуру гелия на выходе из турбины. Рассчитать также массовый часовой расход гелия  $D$ , если действительная мощность турбины равна  $N_T = 40 \text{ Мвт}$ .

**Ответ:**  $t = 196^\circ \text{C}$ ;  $D = 55,1 \cdot 10^3 \text{ кг/ч}$ .

**13-5.** Начальные параметры воздуха, поступающего в компрессор ГТУ со сжиганием топлива при  $p = \text{const}$ , равны:  $p_1 = 1 \text{ кг/см}^2$ ,  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ . Степень повышения давления в компрессоре ГТУ равна  $\beta = 6$ . Температура газов перед соплами турбины равна  $t_3 = 700^\circ \text{C}$ . Рабочее тело обладает свойствами воздуха, теплоемкость его рассчитывается по молекулярно-кинетической теории. Компрессор засасывает  $2 \cdot 10^5 \text{ кг/ч}$  воздуха.

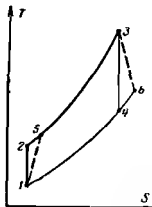


Рис. 13-1. К задаче 13-5.

Определить:

1) Параметры всех точек идеального цикла ГТУ (т. е. такого цикла, в котором процессы сжатия и расширения изоэнтропические), термический к. п. д. ГТУ, теоретические мощности турбины, компрессора и всей ГТУ.

2) Параметры всех точек действительного цикла, т. е. с учетом необратимости процессов расширения и сжатия в турбине и компрессоре, приняв внутренние относительные к. п. д. турбины и компрессора соответственно  $\eta_{0t}^T = 0,87$  и  $\eta_{0c}^K = 0,85$ .

3) Внутренний к. п. д. ГТУ, действительные мощности турбины, компрессора и всей ГТУ. Принять  $k=1,4$ . Представить оба цикла в  $Ts$ -диаграмме.

### Решение

На рис. 13-1 представлены обратимый 12341 и необратимый 15361 циклы ГТУ в  $Ts$ -диаграмме.

Температуры в точках обратимого цикла рассчитываются следующим образом.

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \cdot 6^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 489 \text{ } ^\circ\text{K}; \quad t_2 = 216 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_3 = \frac{T_3 T_1}{T_2} = \frac{973 \cdot 293}{489} = 583 \text{ } ^\circ\text{K}; \quad t_3 = 310 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Термический к. п. д. равен:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{1}{k}}} = 1 - \frac{1}{6^{\frac{1}{1,4}}} = 0,401.$$

Теоретические мощности:

$$N_0^T = D(i_3 - i_4) = Dc_p(t_3 - t_4) = \frac{8,314 \cdot 7 \cdot (700 - 310) \cdot 2 \cdot 10^5}{2 \cdot 28,96 \cdot 3600} = 21800 \text{ квт.}$$

$$N_0^K = D(i_2 - i_1) = Dc_p(t_2 - t_1) = \frac{8,314 \cdot 7 \cdot (216 - 20) \cdot 2 \cdot 10^5}{2 \cdot 28,96 \cdot 3600} = 10900 \text{ квт.}$$

$$N_0^{\text{ГТУ}} = N_0^T - N_0^K = 21800 - 10900 = 10900 \text{ квт.}$$

Температуры в точках реального цикла рассчитываются следующим образом.

С помощью основной формулы для внутреннего относительного к. п. д. компрессора находится температура конца сжатия  $t_5$ :

$$\eta_{0c}^K = \frac{i_2 - i_1}{i_5 - i_1} = \frac{t_2 - t_1}{t_5 - t_1}.$$

Отсюда

$$t_6 = \frac{t_2 - t_1}{\eta_{oi}^k} + t_1 = \frac{216 - 20}{0,85} + 20 = 251 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура в конце необратимого адиабатического расширения находится аналогично:

$$\eta_{oi}^r = \frac{i_3 - i_6}{i_3 - i_4} = \frac{t_3 - t_6}{t_3 - t_4}.$$

Отсюда

$$t_6 - t_3 = \eta_{oi}^r (t_3 - t_4) = 700 - 0,87(700 - 310) = 361 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Внутренний к. п. д. ГТУ определяется:

$$\eta_{i}^{ГТУ} = \frac{(i_3 - i_6) - (i_5 - i_1)}{i_3 - i_5} = \frac{(t_3 - t_6) - (t_5 - t_1)}{t_3 - t_5} = \\ = \frac{(700 - 361) - (251 - 20)}{700 - 251} = 0,242.$$

Действительная мощность турбины равна:

$$N_{\lambda}^r = D(i_3 - i_6) = Dc_p(t_3 - t_6) = \frac{8,314 \cdot 7 \cdot (700 - 361) \cdot 2 \cdot 10^6}{2 \cdot 28,96 \cdot 3600} = \\ = 18900 \text{ кВт.}$$

Либо

$$N_{\lambda}^r = N_0^r \eta_{oi}^r = 21800 \cdot 0,87 = 18900 \text{ кВт.}$$

Действительная мощность привода компрессора равна:

$$N_{\lambda}^k = D(i_5 - i_1) = Dc_p(t_5 - t_1) = \frac{8,314 \cdot 7 \cdot (251 - 20) \cdot 2 \cdot 10^6}{2 \cdot 28,96 \cdot 3600} = \\ = 12900 \text{ кВт.}$$

Или

$$N_{\lambda}^k = N_0^k / \eta_{oi}^k = 10900 / 0,85 = 12900 \text{ кВт.}$$

Действительная мощность газотурбинной установки равна:

$$N_{\lambda}^{ГТУ} = N_{\lambda}^r - N_{\lambda}^k = 18900 - 12900 = 6000 \text{ кВт.}$$

Из приведенного расчета видно, как сильно влияет необратимость процессов сжатия и расширения газа на к. п. д. и мощность газотурбинной установки.

13-6. Газотурбинная установка, в которой топливо сгорает при  $p = \text{const}$ , работает при следующих параметрах:

$t_1 = 12^\circ\text{C}$ ,  $p_1 = 0,9 \text{ кг/см}^2$ , степень повышения давления  $\beta = 7$ ; температура газов перед соплами турбины равна  $750^\circ\text{C}$ . Внутренние относительные к. п. д. турбины и компрессора равны

$$\eta_{0i}^T = \eta_{0i}^K = 0,8.$$

Вторая установка работает при тех же параметрах, но за счет улучшения проточных частей турбины и компрессора, внутренние относительные к. п. д. были повышены до значений

$$\eta_{0i}^T = \eta_{0i}^K = 0,85.$$

Рассчитать величины внутренних к. п. д. первой и второй ГТУ, выяснив тем самым влияние качества процессов сжатия и расширения на к. п. д. установки. Принять показатель адиабаты  $k=1,4$ .

Определить также термический к. п. д. установки.

Ответ:  $\eta_{i,1} = 0,178$ ;  $\eta_{i,2} = 0,248$ ;  $\eta_t = 0,426$ .

13-7. Известно, что термический к. п. д. цикла ГТУ с подводом тепла при  $p = \text{const}$  не зависит от температуры газа перед турбиной, но внутренний к. п. д. зависит от этой температуры.

Рассчитать значение внутренних к. п. д. ГТУ для двух случаев:

1)  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $\beta = 7$ , температура газа перед турбиной  $t_2 = 600^\circ\text{C}$ ;  $\eta_{0i}^T = \eta_{0i}^K = 0,85$ .

2)  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $\beta = 7$ ,  $t_3 = 800^\circ\text{C}$ ,  $\eta_{0i}^T = \eta_{0i}^K = 0,85$ .

Принять показатель адиабаты  $k=1,4$ , а теплоемкость газов считать постоянной.

Ответ:  $\eta_{i,1} = 0,186$ ;  $\eta_{i,2} = 0,253$ .

13-8. Для газотурбинной установки, в которой сжигается топливо при  $p = \text{const}$ , известно: начальные параметры воздуха  $p_1 = 0,9 \cdot 10^6 \text{ н/м}^2$ ,  $t_1 = 10^\circ\text{C}$ , степень повышения давления  $\beta = 6,5$ , температура газов перед турбиной  $t_3 = 800^\circ\text{C}$ , внутренние относительные к. п. д. турбины  $\eta_{0i}^T = 0,88$  и компрессора  $\eta_{0i}^K = 0,85$ .

Определить параметры всех точек действительного цикла, действительные мощности турбины, компрессора и всей ГТУ, внутреннюю к. п. д. ГТУ. Считать, что рабочее тело обладает свойствами воздуха, учесть зависимость теплоемкости воздуха от температуры. Задачу решить с помощью таблиц ВТИ [Л. 3]. Производительность компрессора  $D=300 \text{ т/ч}$ .

### Решение

На рис. 13-1 изображен цикл ГТУ (15361).

Из таблиц ВТИ для первого состояния ( $t_1 = 10^\circ\text{C}$ ) имеем:

$$\pi_{01} = 1,1326; i_1 = 67,65 \text{ ккал/кг.}$$

Второе приведенное давление  $\pi_{02}$  находится:

$$\pi_{02} = \frac{p_2}{p_1} \pi_{01} = 6,5 \cdot 1,1326 = 7,362.$$

По величине этого приведенного давления находим в таблицах величины, соответствующие обратимому сжатию (процесс 1-2):  $t_2=208,5^\circ\text{C}$ ;  $i_2=115,6$  ккал/кг.

Действительная величина энтальпии после сжатия в компрессоре определяется:

$$i_3 = \frac{i_2 - i_1}{\eta_{oi}^k} + i_1 = \frac{115,6 - 67,65}{0,85} + 67,65 = \\ = 124,06 \text{ ккал/кг.}$$

Для состояния 3 ( $t_3=800^\circ\text{C}$ ) из таблиц выписываем необходимые величины:

$$p_{03}=151,21; i_3=269,86 \text{ ккал/кг.}$$

Приведенное давление в точке 4 находим:

$$p_{04} = \frac{p_4 p_{03}}{p_a} = \frac{151,21}{6,5} = 23,26$$

и по этой величине из таблиц получаем:

$$t_4=387,8^\circ\text{C}, i_4=160,4 \text{ ккал/кг.}$$

Энтальпию в конце действительного расширения (точка 6) подсчитываем по формуле

$$i_6 = i_3 - \eta_{oi}^T (i_3 - i_4) = 269,86 - 0,88 (269,86 - 160,4) = \\ = 173,53 \text{ ккал/кг.}$$

Внутренний к. п. д. установки рассчитывается:

$$\eta_k^{\text{ГТУ}} = \frac{(i_2 - i_6) - (i_5 - i_1)}{i_3 - i_6} = \frac{(269,86 - 173,53) - (124,06 - 67,65)}{269,86 - 124,06} = \\ = 0,274.$$

Действительная мощность компрессора равна:

$$N_{\text{д}}^{\text{к}} = \frac{D (i_5 - i_1)}{860} = \frac{(124,06 - 67,65) \cdot 300 \cdot 10^3}{860} = 19\,680 \text{ квт.}$$

Действительная мощность турбины равна:

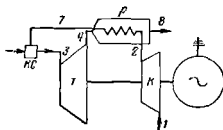
$$N_{\text{д}}^{\text{т}} = \frac{D (i_3 - i_6)}{860} = \frac{(269,86 - 173,53) \cdot 300 \cdot 10^3}{860} = 33\,600 \text{ квт.}$$

Действительная мощность ГТУ равна:

$$N_{\text{д}}^{\text{ГТУ}} = N_{\text{д}}^{\text{т}} - N_{\text{д}}^{\text{к}} = 33\,600 - 19\,680 = 13\,920 \text{ квт.}$$

13-9. На рис. 13-2 представлена схема ГТУ с регенерацией, а также цикл в  $TS$ -диаграмме. Для этой установки известно:  $p_1 = 10^5 \text{ н/м}^2$ ;  $t_1 = 15^\circ \text{С}$ ;  $\beta = p_2/p_1 = 4,8$ ;  $t_3 = 780^\circ \text{С}$ . Внутренние относительные к. п. д. турбины и компрессора равны  $\eta_{\text{от}}^T = 0,85$  и  $\eta_{\text{от}}^K = 0,83$ . Регенерация предельная. Рабочее тело обладает свойствами воздуха, теплоемкость которого следует рассчитывать по молекулярно кинетической теории

Определить параметры всех точек цикла и внутренний к. п. д. ГТУ. Определить также внутренний к. п. д. ГТУ при условии выключения системы регенерации. Рассчитать термический к. п. д. ГТУ с регенерацией



### Решение

На рис. 13-2 представлен цикл ГТУ с предельной регенерацией (1273481); точки 5 и 6 относятся к обратному циклу

Сначала необходимо рассчитать температуры в точках цикла,

$$T_6 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \\ = 288 \cdot 4,8^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 451^\circ \text{К},$$

или  $t_6 = 178^\circ \text{С}$ .

С помощью основной формулы для внутреннего относительного к. п. д. компрессора  $\eta_{\text{от}}^K$  определяем температуру в точке 2:

$$t_2 = \frac{t_6 - t_1}{\eta_{\text{от}}^K} + t_1 = \frac{178 - 15}{0,83} + 15 = 210^\circ \text{С}.$$

Температура  $T_6$  определяется:

$$T_6 = \frac{T_3 T_1}{T_2} = \frac{1053 \cdot 288}{451} = 673^\circ \text{К или } t_6 = 400^\circ \text{С}.$$

Температура в точке 4 определяется с помощью формулы для внутреннего относительного к. п. д. турбины:

$$t_4 = t_3 - \eta_{\text{от}}^T (t_3 - t_6) = 780 - 0,85 (780 - 400) = 457^\circ \text{С}.$$

Термический к. п. д. ГТУ с предельной регенерацией равен:

$$\eta_t = \frac{t_6 - t_1}{t_3 - t_6} = \frac{(178 - 15) - (178 - 15)}{780 - 400} = 0,572.$$

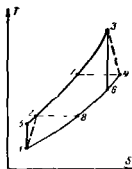


Рис. 13-2. К задаче 13-9.



Внутренний к. п. д. ГТУ с предельной регенерацией равен:

$$\eta_{\text{ГТУ}} = \frac{I_{\text{д}}}{q_{1,\text{д}}} = \frac{(t_3 - t_4) - (t_2 - t_1)}{(t_3 - t_1)} = \\ = \frac{(780 - 457) - (210 - 15)}{780 - 457} = 0,396.$$

Внутренний к. п. д. ГТУ без регенерации равен:

$$\eta_{\text{ГТУ}} = \frac{(t_3 - t_4) - (t_2 - t_1)}{t_3 - t_2} = \frac{(780 - 457) - (210 - 15)}{780 - 212} = 0,225.$$

13-10. Газотурбинная установка, работающая по циклу с подводом тепла при  $p = \text{const}$ , работает с непределной регенерацией (схема рис. 13-2). Параметры установки таковы:  $\beta = 4,8$ ;  $t_1 = 15^\circ \text{C}$ ;  $t_3 = 780^\circ \text{C}$ . Степень регенерации  $\sigma = 0,75$ . Внутренние относительные к. п. д. турбины и компрессора равны  $\eta_{\text{от}}^T = 0,85$  и  $\eta_{\text{от}}^K = 0,83$ .

Рассчитать внутренний к. п. д. такой установки. Считать, что рабочее тело обладает свойствами воздуха; показатель адиабаты принять равным  $k=1,4$ .

Ответ:  $\eta_i = 0,333$ .

13-11. Известно, что термический к. п. д. простейшей газотурбинной установки с подводом тепла при  $p = \text{const}$  возрастает с ростом степени увеличения давления  $\beta$ .

Как будет изменяться термический к. п. д. ГТУ с ростом  $\beta$  при неизменной температуре перед турбиной, если ГТУ работает с предельной регенерацией?

Задачу решить с помощью TS диаграммы

Ответ: С ростом  $\beta$  термический к. п. д. ГТУ с предельной регенерацией будет уменьшаться.

13-12. Рассчитать теоретический цикл ГТУ с двухступенчатым сжатием и двухступенчатым расширением и с предельной регенерацией. Параметры воздуха на входе в компрессор  $p_1 = 10^5 \text{ н/м}^2$ ,  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ , степень повышения давления в обеих ступенях одинакова и равна  $\beta_1 = \beta_2 = 2,4$ , охлаждение воздуха после первого компрессора производится до  $t_3 = 20^\circ \text{C}$ . Температура воздуха перед обеими турбинами одинакова и равна  $800^\circ \text{C}$ . Давление воздуха после первой турбины равно  $2,4 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Расход воздуха  $250 \cdot 10^3 \text{ кг/ч}$ .

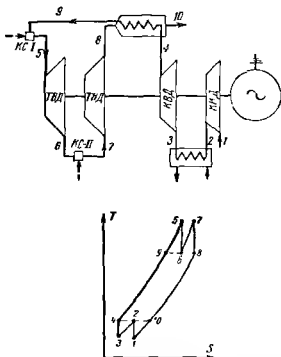


Рис. 13-3. К задаче 13-12.

Определить параметры всех точек цикла, термический к. п. д. ГТУ и теоретическую мощность ГТУ. Теплоемкость воздуха рассчитывать по молекулярно-кинетической теории. Представить цикл ГТУ в  $TS$ -диаграмме.

### Решение

На рис. 13.3 представлен в  $TS$ -диаграмме цикл для такой уставки.

Рассчитываем температуры в точках цикла.

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \cdot 2,4^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 376^\circ \text{ К}; t_2 = 103^\circ \text{ С.}$$

Так как степень повышения давления во второй ступени такая же, как в первой, и по условию  $t_1 = t_8$ , то температуры в точках 2 и 4 равны. Аналогично этому равны температуры в точках 6 и 8.

Температура в точке 8 рассчитывается:

$$T_8 = \frac{T_1 T_4}{T_2} = \frac{293 \cdot 1073}{376} = 836^\circ \text{ К или } t_8 = 563^\circ \text{ С.}$$

Так как по условию регенерация предельная, то

$$t_8 = t_8 = t_9 \text{ и } t_2 = t_1 = t_{10}.$$

При выбранном распределении параметров величины работы (и мощности) двух турбин одинаковы. Также одинаковы и мощности компрессоров.

Термический к. п. д. рассчитывается:

$$\begin{aligned} \eta_t &= \frac{2I_o^T - 2I_o^K}{q_1} = \frac{2c_p(t_8 - t_6) - 2c_p(t_2 - t_1)}{2c_p(t_8 - t_6)} = \\ &= \frac{(800 - 563) - (103 - 20)}{800 - 563} = 0,650. \end{aligned}$$

Теоретическая мощность двух турбин равна:

$2N_o^T = 2Dc_p(t_8 - t_6)$ ; в эту формулу расход газа подставляется в  $\text{кг/сек}$ , а теплоемкость в  $\text{кДж/кг} \cdot ^\circ\text{С}$

$$2N_o^T = 2 \cdot \frac{250 \cdot 10^3}{3600} \cdot \frac{8,314 \cdot 7}{2 \cdot 28,96} (800 - 563) = 33\,100 \text{ кВт.}$$

Теоретическая мощность двух компрессоров равна:

$$2N_o^K = 2Dc_p(t_2 - t_1) = 2 \cdot \frac{250 \cdot 10^3}{3600} \cdot \frac{8,314 \cdot 7}{2 \cdot 28,96} (103 - 20) = 11\,600 \text{ кВт.}$$

Теоретическая мощность ГТУ равна:

$$N_o^{\text{ГТУ}} = 33\,100 - 11\,600 = 21\,500 \text{ кВт.}$$

13-13. Газотурбинная установка работает с двухступенчатым сжатием и двухступенчатым расширением. Степень повышения давления в компрессорах (и понижения в турбинах) одинакова и равна  $\beta_1 = \beta_2 = 2,2$ . В первый компрессор поступает воздух при  $p = 1 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ , после первого компрессора он охлаждается также до  $20^\circ \text{C}$ . Температура воздуха перед обеими турбинами одинакова и равна  $820^\circ \text{C}$ . Внутренние относительные к. п. д. компрессоров равны 0,83, а турбин — 0,86. Степень регенерации равна  $\sigma = 0,7$ . Расход воздуха 250 т/ч.

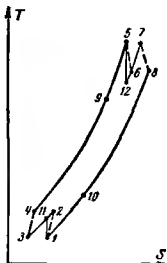


Рис 13-4 К задаче 13-13.

#### Решение

На рис 13-4 представлен цикл такой установки. Точки 11 и 12 относятся к обратному сжатию и расширению.

Рассчитываем температуры в точках цикла:

$$T_{11} = T_1 \left( \frac{p_{11}}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \cdot 2,2^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 367^\circ \text{K}; t_{11} = 94^\circ \text{C}.$$

Для нахождения действительной температуры  $t_2$  после первого компрессора необходимо воспользоваться формулой для относительного внутреннего к. п. д. компрессора, т. е.

$$\eta_{oi}^k = \frac{i_{11} - i_1}{i_2 - i_1} = \frac{t_{11} - t_1}{t_2 - t_1},$$

откуда

$$t_2 = \frac{t_{11} - t_1}{\eta_{oi}^k} + t_1 = \frac{94 - 20}{0,83} + 20 = 109^\circ \text{C}.$$

Так как  $\beta_1 = \beta_2$  и  $t_1 = t_3$ , то  $t_4 = t_2 = 109^\circ \text{C}$ .

Температура в конце обратимого расширения в турбине  $t_{12}$  рассчитывается:

$$T_{12} = \frac{T_1 T_5}{T_{11}} = \frac{293 \cdot 1093}{367} = 873^\circ \text{K}; t_{12} = 600^\circ \text{C}.$$

Действительная температура после расширения в турбине рассчитывается с помощью величины  $\eta_{oi}^T$ , т. е.

$$t_6 = t_5 - \eta_{oi}^T (t_5 - t_{12}) = 820 - 0,86 (820 - 600) = 630^\circ \text{C}.$$

Далее, так как  $\beta_1 = \beta_2$ , а  $t_5 = t_7$ , то  $t_8 = t_6 = 630^\circ \text{C}$ .

Температуру воздуха, входящего в камеру сгорания (температуру после регенератора),  $t_8$  находим с помощью величины степени регенерации  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{t_9 - t_4}{t_8 - t_4}$$

Отсюда

$$t_8 = \sigma(t_9 - t_4) + t_4 = 0,7(630 - 109) + 109 = 474^\circ \text{C}.$$

Так как предполагается, что тепловые потери в регенераторе отсутствуют, то  $t_9 - t_4 = t_8 - t_{10}$ . Следовательно,  $t_{10} = t_8 - (t_9 - t_4) = 630 - (474 - 109) = 255^\circ \text{C}$ .

Внутренний к. п. д. установки равен:

$$\eta_{\text{ГТУ}} = \frac{(t_8 - t_6) + (t_7 - t_5) - [(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)]}{(t_8 - t_6) + (t_7 - t_6)} =$$

$$= \frac{2(t_8 - t_6) - 2(t_2 - t_1)}{(t_8 - t_6) + (t_7 - t_6)} = \frac{2(820 - 630) - 2(109 - 20)}{(820 - 474) + (820 - 630)} = 0,373.$$

Действительная мощность двух турбин равна:

$$2N_{\text{д}}^{\text{T}} = \frac{2Dc_p(t_8 - t_6)}{860} = \frac{2 \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 1,985 \cdot 7(820 - 630)}{860 \cdot 2 \cdot 28,96} =$$

$$= 26\,400 \text{ квт}.$$

Действительная мощность двух компрессоров равна:

$$2N_{\text{д}}^{\text{K}} = \frac{2Dc_p(t_2 - t_1)}{860} =$$

$$= \frac{2 \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 1,986 \cdot 7(109 - 20)}{860 \cdot 2 \cdot 28,96} = 12\,400 \text{ квт}.$$

Действительная мощность ГТУ равна:

$$N_{\text{д}}^{\text{ГТУ}} = 26\,400 - 12\,400 = 14\,000 \text{ квт}.$$

**13-14.** Швейцарской фирмой Эшер Висс спроектирована газотурбинная установка, работающая по замкнутой схеме, с нагреванием газа в атомном реакторе.

Схема установки дается ниже. Рабочим телом является гелий при высоком давлении. В отличие от обычных схем ГТУ в данной установке (рис. 13-5) вместо камеры сгорания установлен атомный реактор, и так как схема замкнутая, то газ не выбрасывается в атмосферу, а поступает в охладитель газа и далее вновь к компрессору.

Параметры гелия по тракту ГТУ следующие:

$$p_1 = 30 \text{ кг/см}^2; t_1 = 32^\circ \text{C}; p_2 = 46,6 \text{ кг/см}^2;$$

$$p_3 = 46,2 \text{ кг/см}^2; t_3 = 32^\circ \text{C}; p_4 = 71,5 \text{ кг/см}^2;$$

$$p_5 = 70 \text{ кг/см}^2; t_5 = 469^\circ \text{C}; p_6 = 69 \text{ кг/см}^2; t_6 = 760^\circ \text{C};$$

$$p_7 = 31 \text{ кг/см}^2; p_8 = 30,5 \text{ кг/см}^2.$$

Через ГТУ проходит 100 кг/сек гелия.

Внутренние относительные к. п. д. компрессоров равны 88%, внутренний относительный к. п. д. турбины  $\eta_{01}^T = 88,9\%$ .

С помощью приведенных данных рассчитать схему ГТУ.

Рассчитать температуры в точках 2, 4, 7 и 8, действительную мощность турбины и двух компрессоров, действительную мощность ГТУ на лопатках, а также электрическую мощность на клеммах ге-

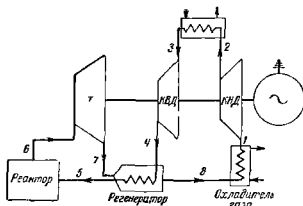


Рис. 13-5. К задаче 13-14.

нератора, приняв механический к. п. д. равным  $\eta_m = 0,985$ , а к. п. д. генератора  $\eta_g = 0,976$ .

Рассчитать электрический к. п. д. ГТУ. Представить цикл ГТУ в  $TS$ -диаграмме.

**Ответ:**  $t_2 = t_4 = 99^\circ \text{C}$ ;  $t_7 = 506^\circ \text{C}$ ;  $t_8 = 136^\circ \text{C}$ . Действительная (на лопатках) мощность турбины  $N_{\text{л}}^T = 132\,000 \text{ кВт}$ . Действительная мощность двух компрессоров  $2N_{\text{л}}^K = 69\,600 \text{ кВт}$ . Мощность на клеммах электрического генератора  $N_g = (132\,000 - 69\,600) \cdot 0,985 \cdot 0,976 = 60\,000 \text{ кВт}$ ;  $\eta_g = 39,8\%$ .

**13-15.** Самолет с прямоточным воздушно-реактивным двигателем летит со скоростью 1 000 км/ч. Температура воздуха  $t = -20^\circ \text{C}$ .

Определить термический к. п. д. цикла, по которому работает двигатель.

**Ответ:**  $\eta_t = 0,132$ .

**13-16.** Самолет летит со скоростью 900 км/ч при температуре воздуха  $10^\circ \text{C}$ . В дальнейшем скорость самолета снижается до 800 км/ч при полете его при температуре воздуха, равной  $0^\circ \text{C}$ .

Определить, насколько изменится термический к. п. д. цикла воздушно-реактивного двигателя, стоящего на самолете.

**Ответ:** Термический к. п. д. меняется от  $\eta_t = 9,9\%$  до  $\eta_t = 8,2\%$ . Влияние скорости полета сильнее, чем влияние температуры окружающей среды.

**13-17.** На рис. 13-6 изображены схема и цикл турбокомпрессорного реактивного двигателя, находящегося на самолете. Самолет летит со скоростью  $c = 850 \text{ км/ч}$  при параметрах воздуха  $t = 0^\circ \text{C}$ ,  $p = 0,4 \cdot 10^6 \text{ н/м}^2$ . Известно, что степень увеличения давления в компрессоре  $\beta = p_3/p_2 = 8$ , а температура газов перед соплами турбины равна  $t_4 = 800^\circ \text{C}$ .

Рассчитать параметры во всех характерных точках цикла, а также скорость газа на выходе из реактивного сопла двигателя.

Считать процессы сжатия обратимыми. Рабочее тело обладает свойствами воздуха; тепловые свойства его рассчитываются по молекулярно-кинетической теории.

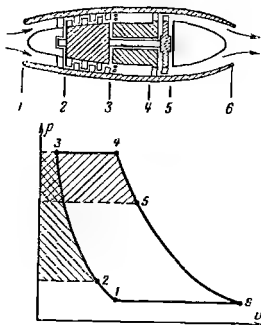


Рис. 13.6. К задаче 13-17.

Ответ:  $t_2 = 27,7^\circ \text{C}$ ;  $p_2 = 0,561 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ;  $p_3 = 4,49 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ;

$t_3 = 271,9^\circ \text{C}$ ;  $t_5 = 555,9^\circ \text{C}$ ;  $p_5 = 1,82 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ;

$t_6 = 264,7^\circ \text{C}$ ;  $c_{\text{вых}} = 765 \text{ м/сек}$ .

13-18. Пользуясь данными предыдущей задачи, рассчитать термический к. п. д. цикла турбокомпрессорного реактивного двигателя, теоретические мощности турбины, компрессора и всего двигателя, приняв расход воздуха, проходящего через двигатель, равным  $D=50 \text{ т/ч}$ .

Ответ:  $\eta_t = 0,50$ .  $N_0^T = N_0^K = 3407 \text{ кВт}$ ;  $N_0^{\text{двиг}} = 3676 \text{ кВт}$ .

## 14. ЦИКЛЫ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

14-1. Рассчитать цикл Карно, который осуществляется насыщенным водяным паром. Установка работает по следующей схеме (рис. 14-1): сухой насыщенный пар давления  $p_1=20 \text{ кг/см}^2$  поступает в цилиндр паровой машины, где изотропически расширяется до  $0,1 \text{ кг/см}^2$ , после чего поступает в теплообменник; там влажный пар частично конденсируется до тех пор, пока его энтропия не установится равной  $s_3=0,5822 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{К}$ . Пароводяная смесь сжимает-

ся компрессором до  $p_4 = p_1$  и кипящая вода подается в котел, где она превращается снова в сухой насыщенный пар.

Определить параметры во всех точках цикла, термический  $\eta$  и  $\eta_{\text{т}}$  цикла, полезную работу, тепло  $q_1$ , подведенное в цикле и  $q_2$  — отведенное нижнему источнику.

Ответ:

| Параметры                | № точек |        |        |        |
|--------------------------|---------|--------|--------|--------|
|                          | 1       | 2      | 3      | 4      |
| $p$ , кг/см <sup>2</sup> | 20,0    | 0,1    | 0,1    | 20,0   |
| $v$ , м <sup>3</sup> /кг | 0,1015  | 11,35  | 3,574  | 0,0012 |
| $t$ , °C                 | 211,38  | 45,45  | 45,45  | 211,38 |
| $i$ , ккал/кг            | 668,5   | 479,3  | 182,1  | 215,9  |
| $s$ , ккал/кг·°C         | 1,5161  | 1,5161 | 0,5822 | 0,5822 |
| $x$                      | 1,000   | 0,759  | 0,239  | 0,000  |

$\eta_t = 0,342$ ;  $q_1 = 1894,9$  кДж/кг;  $q_2 = 1244,3$  кДж/кг;  $l = 650,6$  кДж/кг.

14-2. В установке, описанной в задаче 14-1, теплообменник (рис. 14-1) заменен конденсатором, в котором отработанный в цилиндре паровой машины пар полностью конденсируется до состояния 5,

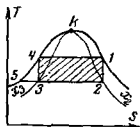
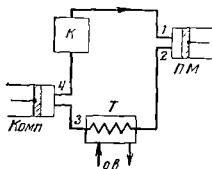


Рис. 14-1. К задаче 14-1.

после чего конденсат сжимается поставленным взамен компрессора водяным насосом до давления  $p_1$  и подается в котел, где подогревается до температуры насыщения, а затем превращается в сухой насыщенный пар. Иными словами, цикл Карно заменяется на цикл Рэнкина.

Каков термический  $\eta$  и  $\eta_{\text{т}}$  этого цикла; на сколько он уменьшился по отношению к  $\eta_{\text{т,к}}$ ? Начальное и конечное давления те же, что и в цикле задачи 14-1.

Ответ:  $\eta_{\text{т,р}} = 0,304$ ;  $\Delta\eta/\eta_{\text{т,к}} = 11\%$ .

14-3. Паротурбинная установка работает по циклу Рэнкина при следующих параметрах пара: перед турбиной  $p_1 = 90$  кг/см<sup>2</sup> и  $t_1 = 535^\circ\text{C}$ ; давление в конденсаторе  $p_2 = 0,04$  кг/см<sup>2</sup> (рис. 14-2). Определить внешнюю работу турбины и питательного насоса, а также

же термический  $\eta$  и  $\eta_{\text{т}}$  цикла с учетом и без учета работы насоса и относительную разность этих  $\eta$  и  $\eta_{\text{т}}$ .

Ответ:  $l_t = 1435$  кДж/кг;  $l_n = 8,7$  кДж/кг;  $\eta_t = 0,426$ ; без учета работы насоса  $\eta'_t = 0,428$ ;  $\Delta\eta/\eta_t = 0,5\%$ . Следует отметить, что в действительности насос потребляет несколько большую работу, так как сжимает воду до давления, превосходящего давление пара в котле.

**14-4.** Паротурбинная установка работает по циклу Ренкина с начальными параметрами  $p_1=100 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1=530^\circ\text{C}$ . Давление в конденсаторе  $p_2=0,04 \text{ кг/см}^2$ .

Определить термический к. п. д. установки и сравнить его с термическим к. п. д. цикла Карно в том же интервале температур.

Ответ:  $\eta_t=0,427$ ;  $\eta_{t,K}=0,625$ .

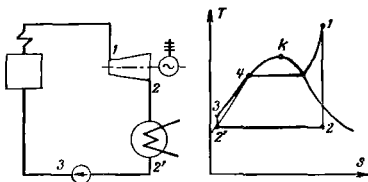


Рис. 14-2. К задаче 14-3.

**14-5.** Определить, какова должна быть температура пара перед входом в турбину, если его давление при этом  $p_1=100 \text{ кг/см}^2$ , давление в конденсаторе  $p_2=0,04 \text{ кг/см}^2$ , а влажность на выходе из турбины не должна превышать 15%. Задачу решить по таблицам.

Ответ:  $t_1 \geq 738^\circ\text{C}$ .

**14-6.** При одинаковой начальной температуре  $t_1=500^\circ\text{C}$  построить кривую зависимости  $\eta_t$  цикла паротурбинной установки от величины начального давления  $p_1$ , приняв его равным 50, 100, 150 и 200  $\text{кг/см}^2$ . Давление в конденсаторе одинаково и равно  $p_2=0,04 \text{ кг/см}^2$ . Учесть работу питательного насоса. Представить циклы в  $Ts$ -диаграмме.

|                               |       |       |       |       |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Ответ: $p_1, \text{ кг/см}^2$ | 50    | 100   | 150   | 200   |
| $\eta_t$                      | 0,395 | 0,423 | 0,435 | 0,442 |

**14-7.** При одинаковом начальном давлении  $p_1=100 \text{ кг/см}^2$  построить кривую зависимости  $\eta_t$  цикла паротурбинной установки от начальной температуры  $t_1$ , приняв ее равной 450, 500, 550 и  $600^\circ\text{C}$ . Давление в конденсаторе одинаково и равно  $p_2=0,05 \text{ кг/см}^2$ . Учесть работу питательного насоса. Представить циклы в  $Ts$ -диаграмме.

|                              |       |       |       |       |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Ответ: $t_1, ^\circ\text{C}$ | 450   | 500   | 550   | 600   |
| $\eta_t$                     | 0,412 | 0,419 | 0,427 | 0,434 |

**14-8.** Паротурбинная установка работает при параметрах пара перед турбиной  $p_1=90 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1=535^\circ\text{C}$ . Построить кривую зависимости термического к. п. д. цикла от величины давления в конденсаторе, которое принять равным  $p_2=0,02, 0,04, 0,06$  и  $0,08 \text{ кг/см}^2$ .

|                               |       |       |       |       |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Ответ: $p_2, \text{ кг/см}^2$ | 0,02  | 0,04  | 0,06  | 0,08  |
| $\eta_t$                      | 0,442 | 0,426 | 0,416 | 0,409 |



14-9. Определить суточную экономию топлива, получающуюся в результате замены турбинной установки, работавшей при параметрах  $p_1=35 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1=450^\circ \text{C}$ , на установку с начальными параметрами  $p_1=300 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1=650^\circ \text{C}$ .

Давление в конденсаторах одно и то же и равно  $p_2=0,04 \text{ кг/см}^2$ , мощность установки  $N=50\,000 \text{ кВт}$ , теплота сгорания топлива  $Q_{\text{н}}^{\text{Р}}=8\,000 \text{ ккал/кг}$ , а к. п. д. котельных установок  $\eta_{\text{ку}}=0,80$  в старой и  $0,90$  в новой установке. Потерями во всех остальных частях (кроме котельного агрегата) пренебречь.

Ответ:  $122 \text{ т/сутки}$ .

14-10. Определить зависимость термического к. п. д. паротурбинной установки от начальных параметров пара, если при начальных и конечных давлениях, равных соответственно  $p_1=30 \text{ кг/см}^2$  и  $p_2=0,04 \text{ кг/см}^2$ , пар перед турбиной: а) имеет сухость  $x=0,9$ , б) сухой насыщенный; в) перегретый до температуры  $450^\circ \text{C}$ .

Ответ: а)  $\eta_t=0,342$ ; б)  $0,346$ ; в)  $0,371$ .

14-11. Паровая турбина мощностью  $25 \text{ Мвт}$  работает при начальных параметрах  $p_1=100 \text{ кг/см}^2$  и температуре  $t_1=510^\circ \text{C}$ . Давление в конденсаторе  $p_2=0,04 \text{ кг/см}^2$ . Теплота сгорания топлива  $Q_{\text{н}}^{\text{Р}}=7\,000 \text{ ккал/кг}$ .

Определить теплопроизводительность котельной установки и часовой расход топлива, если  $\eta_{\text{ку}}=0,85$ , а температура питательной воды  $t_{\text{пр}}=90^\circ \text{C}$ .

Ответ:  $B=7\,770 \text{ кг/ч}$ ;  $Q_1=46,2 \text{ Гкал/ч}=53,8 \text{ Мвт}$ .

14-12. Определить состояние пара за турбиной и подсчитать внутренний к. п. д. паротурбинной установки, если начальные параметры  $p_1=130 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1=565^\circ \text{C}$ , давление в конденсаторе  $p_2=0,04 \text{ кг/см}^2$ , внутренние относительные к. п. д. турбины и питательного насоса соответственно равны  $\eta_{oi}^{\text{т}}=0,85$  и  $\eta_{oi}^{\text{н}}=0,87$ .

### Решение

Цикл, по которому работает установка, изображен на рис. 14-3. Определим сначала состояние пара в конце изэнтропического расширения пара в турбине. Начальную энтальпию и энтропию находим по таблицам [Л. 4]. Они равны  $i_1=838,3 \text{ ккал/кг}$  и  $s_1=1,5909 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ \text{К}$ . Энтальпию пара в точке 2 находим, рассчитывая изэнтропический процесс 1-2:

$$x_2 = \frac{s_1 - s'_2}{s''_2 - s'_2} = \frac{1,5909 - 0,0998}{2,0255 - 0,0998} = 0,774; \quad i_2 = i'_2 + x_2 i''_2 = 28,7 + 581,1 \cdot 0,774 = 478,5 \text{ ккал/кг}.$$

Таким образом, изэнтропический теплоперепад равен:

$$H_2 = i_1 - i_2 = 838,3 - 478,5 = 359,8 \text{ ккал/кг}.$$

По определению

$$\eta_{oi}^{\text{т}} = \frac{i_1 - i_{2\text{к}}}{i_1 - i_2} = \frac{i_1 - i_{2\text{к}}}{H_2}.$$

Следовательно,

$$i_1 - i_{2д} - \eta_{oi} H_0; i_{2д} = i_1 - \eta_{oi}^H H_0 = \\ = 838,3 - 0,85 \cdot 359,8 = 532,5 \text{ ккал/кг.}$$

Зная энтальпию, по таблицам легко найти остальные параметры (при  $p_2 = 0,04 \text{ кг/см}^2$ ):

$$x_{2д} = \frac{i_{2д} - i'_2}{r_2} = \frac{532,5 - 28,7}{581,1} = 0,867;$$

$$v_{2д} = v'_2 (1 - x_{2д}) + v''_2 x_{2д} = 0,0010 \cdot 0,133 + \\ + 35,46 \cdot 0,867 = 30,74 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$s_{2д} = s'_2 (1 - x_{2д}) + s''_2 x_{2д} = 0,0998 \cdot 0,133 + \\ + 2,0255 \cdot 0,867 = 1,7694 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ \text{К.}$$

Внутренний к. п. д. цикла определяется по формуле

$$\eta_i = \frac{H_0 \eta_{oi}^T - (i_1 - i_{2д}) / \eta_{oi}^H}{i_1 - i_{2д}}.$$

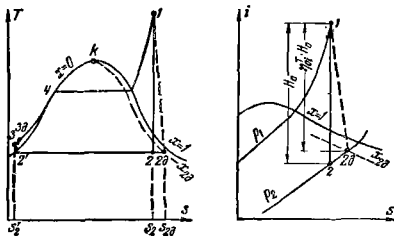


Рис. 14-3. К задаче 14-12.

Находим энтальпию воды после теоретического и действительного (с учетом потерь) сжатия в насосе. Энтальпия  $i_{2'} = i'_2 = 28,7 \text{ ккал/кг}$ ; энтропия  $s_{2'} = s'_2 = 0,0998 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ \text{К}$ . Энтальпия в точке 3 определяется в результате расчета изэнтропического процесса 2'-3 ( $s_{2'} = \text{const}$ ). Интерполируя табличные данные ([1, 4], табл. III), находим при давлении  $p_3 = p_1 = 130 \text{ кг/см}^2$  и  $s_3 = 0,0998 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ \text{К}$  энтальпию  $i_3 = 31,8 \text{ ккал/кг}$ . Разность  $i_3 - i_{2'} = 31,8 - 28,7 = 3,1 \text{ ккал/кг}$  представляет собой теоретическую работу насоса.

Энтальпия в конце сжатия  $i_{2д}$  с учетом потерь определяется:

$$i_{2д} = \frac{i_3 - i_{2'} (1 - \eta_{oi}^H)}{\eta_{oi}^H} = \frac{31,8 - 28,7 (1 - 0,87)}{0,87} = 32,3 \text{ ккал/кг.}$$

Таким образом

$$\eta_i = \frac{359,8 - 0,85 - 3,1/0,87}{838,3 - 32,3} = 0,375.$$

Определим теперь термический к. п. д. цикла Рэнкина (который не учитывает потери):

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2 - (i_3 - i_{2'})}{i_1 - i_2} = \frac{838,3 - 478,5 - 3,1}{838,3 - 31,8} = 0,442.$$

Если при определении внутреннего к. п. д. установки пренебречь работой насоса, то окажется, что:

$$\eta_i \approx \eta'_i = \frac{H_0 \eta_{oi}^T}{i_1 - i_{2'}} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2'}} \eta_{oi}^T = \eta'_i \eta_{oi}^T = 0,444 \cdot 0,85 = 0,377.$$

Здесь  $\eta'_i = (i_1 - i_2)/(i_1 - i_{2'}) = (838,3 - 478,5)/(838,3 - 28,7) = 0,444$  есть несколько завышенный термический к. п. д. цикла, не учитывающий работу насоса.

Разница между  $\eta_i$  и  $\eta'_i$  в нашем случае составляет 0,53%. Приблизительно на такую же величину будет допущена ошибка и в определении расхода топлива. Тем не менее соотношение

$$\eta_i = \eta_{oi}^T \eta'_i$$

широко применяется в теплотехнических расчетах. Его можно считать вполне удовлетворительным при невысоких параметрах пара перед турбиной, когда работой насоса можно пренебрегать.

**14-13.** Определить внутренний относительный к. п. д. турбины, если внутренние потери вследствие необратимости процесса расширения пара и турбине составляют 33 ккал/кг.

Состояние пара перед турбиной  $p_1 = 100$  кг/см<sup>2</sup>;  $t_1 = 500^\circ \text{C}$ , давление в конденсаторе  $p_2 = 0,04$  кг/см<sup>2</sup>.

**Ответ:**  $\eta_{oi}^T = 0,90$ .

**14-14.** Определить параметры пара перед конденсатором, где давление  $p_2 = 0,04$  кг/см<sup>2</sup>, если параметры пара перед турбиной  $p_1 = 90$  кг/см<sup>2</sup> и  $t_1 = 510^\circ \text{C}$ , а внутренний относительный к. п. д. турбины  $\eta_{oi}^T = 0,87$ . Построить процесс в  $i$ s- и  $T$ s-диаграммах. Задачу решить, пользуясь таблицами.

**Ответ:**  $x_{2д} = 0,854$ ;  $i_{2д} = 525,0$  ккал/кг;  $p_2 = 0,04$  кг/см<sup>2</sup>;  $s_{2д} = 1,745$  ккал/кг $^\circ \text{K}$ ;  $v_{2д} = 30,3$  м<sup>3</sup>/кг.

**14-15.** Определить состояние пара за турбиной и подсчитать внутренний к. п. д. установки, если  $p_1 = 110$  кг/см<sup>2</sup>;  $t_1 = 550^\circ \text{C}$ ;  $p_2 = 0,04$  кг/см<sup>2</sup> и внутренний относительный к. п. д. турбины  $\eta_{oi}^T = 0,85$ . Работу насоса не учитывать. Задачу решить, пользуясь  $i$ s-диаграммой.

**Ответ:**  $x_{2д} = 0,872$ ;  $\eta_i = 0,372$

14-16. Сравнить внутренние к.п.д. двух паротурбинных установок с атомными реакторами

Обе установки работают по двухконтурной схеме (рис. 14-4). В первом контуре (атомного реактора) теплоносителем является вода.

В установке, выполненной по первому варианту, вода из первого контура направляется в парогенератор, по второму контуре которого образуется сухой насыщенный пар с давлением  $p_1 = 40 \text{ кг/см}^2$ . Этот пар и подается в турбину.

В установке по второму варианту в парогенераторе образуется перегретый пар с параметрами  $p_1 = 16 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1 = 250^\circ \text{C}$ .

Давление в конденсаторе одинаково для обеих установок и равно  $p_2 = 0,04 \text{ кг/см}^2$ , а внутренний относительный к.п.д. турбин  $\eta_{oi}^* = 0,80$ .

Циклы, по которым работают установки, изображены на рис. 14-5.

Ответ:  $\eta_i^I = 0,291$ ;  $\eta_i^{II} = 0,261$ .

14-17. Определить к.п.д. станции брутто (т.е. без учета расхода энергии на собственные нужды), если параметры пара перед турбиной  $p_1 = 90 \text{ кг/см}^2$ ,  $t_1 = 535^\circ \text{C}$ , давление в конденсаторе  $p_2 = 0,04 \text{ кг/см}^2$  и если известны следующие к.п.д.: относительный

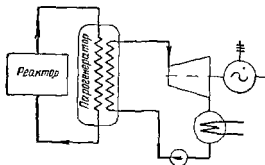


Рис. 14-4. К задаче 14-16

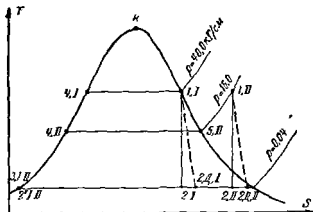


Рис. 14-5. К задаче 14-16.

внутренний  $\eta_{oi} = 0,86$ , механический  $\eta_m = 0,95$ , электрогенераторов  $\eta_g = 0,98$ , паропроводов (учитывающий потери паропроводами тепла в окружающую среду)  $\eta_{пп} = 0,94$ , котельных агрегатов  $\eta_{ку} = 0,92$ .

Работу насосов не учитывать

Ответ:  $\eta_{ист}^{бр} = 29,7\%$ .

14-18. Мощность паротурбинной установки на клеммах электрогенератора равна  $N_g = 50 \text{ Мвт}$ . Определять удельный расход топлива

10\*

$b_0$  и удельный расход тепла  $q_0$  на 1 Мдж выработанной электроэнергии, а также часовой расход топлива  $B_0$ , если пар на входе в турбину имеет параметры  $p_1=35 \text{ кг/см}^2$ ,  $t_1=435^\circ \text{C}$ , давление в конденсаторе  $p_2=0,04 \text{ кг/см}^2$ .

Известны: внутренний относительный к. п. д. турбины  $\eta_{oi}=0,79$ , механический к. п. д.  $\eta_m=0,96$ , к. п. д. электрогенератора  $\eta_e=0,98$  и к. п. д. котла  $\eta_{ку}=0,88$ . Теплота сгорания топлива  $Q_H^p=3500 \text{ ккал/кг}$ .

Ответ:  $b_0=0,258 \text{ кг/Мдж}$ ;  $B_0=48350 \text{ кг/ч}$ ;  $q_0=3,93$ . Удельный расход тепла на 1 Мдж — безразмерная величина (размерность  $[q_0]=\text{дж/дж}$ ).

14-19. Удельный расход пара на выработку электроэнергии в турбогенераторе, мощностью  $N_0=25 \text{ Мвт}$  составляет  $d_0=2 \text{ кг/Мдж}$ .

Каковы термический к. п. д. цикла, относительный эффективный к. п. д. турбины  $\eta_{oe}$  и часовой расход пара  $D_0$ , если известно, что

к. п. д. электрического генератора  $\eta_e=0,98$ . Параметры пара перед соплами турбины  $p_1=90 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1=540^\circ \text{C}$ . Давление пара на выходе из турбины (противодавление)  $p_2=6,5 \text{ кг/см}^2$ . Температура питательной воды  $t_{пв}=140^\circ \text{C}$ .

Работа насоса не учитывается.

Ответ:  $\eta_i=0,243$ ;  $\eta_{oe}=0,723$ ;  $D_0=180 \text{ т/ч}$ .

14-20. В паротурбинной установке, работающей с начальными параметрами  $p_1=110 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1=550^\circ \text{C}$ , осуществляются два отбора на собственные нужды: при  $p_a=40 \text{ кг/см}^2$  отбирается 20 000 кг/ч пара и при  $p_c=25 \text{ кг/см}^2$  отбирается 10 000 кг/ч. Давление в конденсаторе  $p_2=0,04 \text{ кг/см}^2$ .

Определить внутреннюю мощность турбины, если ее  $\eta_{oi}=0,80$ , а паропроизводительность котельной установки  $D=100 \text{ т/ч}$ , и найти безразмерный удельный расход тепла. Работу питательного насоса не учитывать.

Ответ:  $N_1=25350 \text{ кВт}$ ;  $q_i=1/\eta_i=3,59$ .

14-21. К соплам паровой турбины поступает пар с параметрами  $p_1=170 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1=550^\circ \text{C}$ . После изотропического расширения до  $t_a=350^\circ \text{C}$  он направляется в промежуточный пароперегреватель, где его температура повышается до  $t_{пв}=520^\circ \text{C}$ ; затем пар расширяется в последующих ступенях турбины до давления в конденсаторе  $p_2=0,04 \text{ кг/см}^2$  (рис. 14-6).

Определить, насколько уменьшается влажность пара на выходе из турбины и насколько увеличивается термический к. п. д. цикла в результате введения вторичного перегрева. Каковы средние

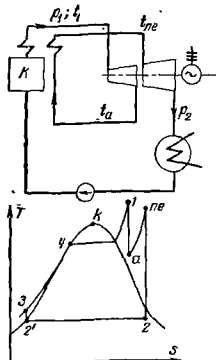


Рис. 14-6. К задаче 14-21.

интегральные температуры подвода и отвода тепла в цикле с промежуточным перегревом?

Ответ: Относительное уменьшение влажности

$$[(1-x)/(1-x)]100=29\%$$

Относительное увеличение термического к. п. д.

$$100\Delta\eta/\eta=2,9\%.$$

Средняя интегральная температура подвода тепла  $T_{ср}=559^\circ\text{К}$ .

14-22. Отрабатывавший в цилиндре высокого давления (д. в. д.) турбины пар давления  $p_a=15\text{ кг/см}^2$  направляется в промежуточный перегреватель.

До какой температуры нужно перегреть пар в промежуточном пароперегревателе, чтобы при дальнейшем изотропическом расширении в ц. н. л. пар при конечном давлении  $p_2=0,04\text{ кг/см}^2$  имел бы сухость  $x_2=0,9$ ?

Ответ: До  $t_{пе}=535^\circ\text{С}$

14-23. Паротурбинная установка мощностью  $N=200\text{ Мвт}$  работает с паром следующих параметров: начальное давление  $p_1=127,5\cdot 10^5\text{ н/м}^2$ , температура  $t_1=565^\circ\text{С}$ . Промежуточный перегрев осуществляется при давлении  $p_a=19,62\cdot 10^5\text{ н/м}^2$  до первоначальной температуры  $t_{пе}=565^\circ\text{С}$ . Давление в конденсаторе  $p_2=0,0392\cdot 10^5\text{ н/м}^2$ . Температура питательной воды  $t_n=160^\circ\text{С}$ .

Определить часовой расход топлива  $B$ , кг/ч, если теплота сгорания топлива  $Q_H^p=30\,000\text{ кДж/кг}$ , а к. п. д. котельного агрегата  $\eta_{ку}=0,91$ . Потерями пренебречь.

Ответ:  $B=49\,000\text{ кг/ч}$ .

14-24. При проектировании мощной тепловой станции были сделаны расчеты в двух вариантах: 1) на начальные параметры  $p_1=300\text{ кг/см}^2$  и  $t_1=650^\circ\text{С}$  с двумя промежуточными перегревами пара до  $565^\circ\text{С}$  при давлениях 65 и  $15\text{ кг/см}^2$  и 2) на параметры  $p_1=220\text{ кг/см}^2$  и  $t_1=580^\circ\text{С}$  с одним промежуточным перегревом до  $565^\circ\text{С}$  при давлении  $34\text{ кг/см}^2$ . Давление в конденсаторе  $p_2=0,04\text{ кг/см}^2$ .

Сравнить термические к. п. д. циклов этих установок, не учитывая работу питательных насосов. Представить циклы в  $Ts$ -диаграмме.

Ответ:  $\eta_{t,1}=0,504$ ;  $\eta_{t,2}=0,477$ .

14-25. Определить термический к. п. д. цикла с предельной регенерацией тепла в паротурбинной установке, в которой пар перед турбиной имеет параметры  $p_1=35\text{ кг/см}^2$  и  $t_1=435^\circ\text{С}$ , а давление в конденсаторе  $p_2=0,05\text{ кг/см}^2$ .

Вода подогревается до температуры  $t_p=130^\circ\text{С}$ . Работу насоса не учитывать.

Ответ:  $\eta_{t,p}^{\text{пред}}=40,9\%$ .

14-26. Турбина, в которую поступает пар с параметрами  $p_1=90\text{ кг/см}^2$  и  $t_1=535^\circ\text{С}$ , имеет один регенеративный отбор при  $p^0=3\text{ кг/см}^2$  в смешивающий подогреватель. Давление за турбиной  $p_2=0,04\text{ кг/см}^2$ .

Найти термический к. п. д. регенеративного цикла и сравнить его с термическим к. п. д. цикла с предельной регенерацией тепла

при условии, что в последнем цикле вода подогревается до той же температуры, что и в цикле с одним смешивающим подогревателем<sup>1</sup>.

Ответ:  $\eta_{т.р} = 0,457$ ;  $\eta_{т.р}^{\text{пред}} = 0,470$ .

14-27. В паровую турбину (рис. 14-7) поступает пар с параметрами  $p_1 = 90 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1 = 540^\circ \text{C}$ . Турбина имеет два регенератив-

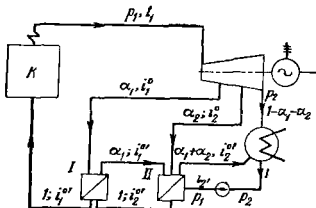


Рис. 14-7. К задаче 14-27.

ных отбора в подогревателях поверхностного типа с каскадным сбором конденсата греющего пара. Давления отборов  $p_1^0 = 5,0 \text{ кг/см}^2$  и  $p_2^0 = 1,2 \text{ кг/см}^2$ . Давление в конденсаторе  $p_2 = 0,04 \text{ кг/см}^2$ .

Определить термический к. п. д. регенеративного цикла и удельный расход пара на 1 Мдж и на 1 кВт·ч выработанной энергии. Сравнить эти показатели с такими же показателями для цикла без регенерации. Вычислить величину экономии от введения регенеративного подогрева.

#### Решение

Согласно схеме рис. 14-7 находим по  $i$ -с-диаграмме и таблицам необходимые для расчета величины энтальпий:  $i_1 = 833$ ;  $i_2 = 488$ ;  $i_1^0 = 653$ ;  $i_2^0 = 594$ ;  $i_1' = 152$ ;  $i_2' = 104$  и  $i_2'' = 29 \text{ ккал/кг}$ .

Для того чтобы найти значения отборов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , составляем балансы подогревателей. Баланс 1-го подогревателя:

$$\alpha_1 (i_1^0 - i_1') - i_1' - i_2'.$$

Баланс 2-го подогревателя

$$\alpha_2 (i_2^0 - i_2') + \alpha_1 (i_1' - i_2') = i_2' - i_2''.$$

Решая их совместно, находим  $\alpha_1 = 0,0958$  и  $\alpha_2 = 0,1430$ .

<sup>1</sup> Во всех задачах на регенеративные циклы считается, что в подогревателях вода нагревается до температуры конденсата греющего пара. Работа насосов не учитывается.

Термический к. п. д. регенеративного цикла

$$\eta_{t, p} = i_{21}/q_1 = \frac{i_1 - i_2 - \alpha_1 (i_1^0 - i_2) - \alpha_2 (i_2^0 - i_2)}{i_1^0 - i_1^{0'}} = \frac{314}{681} = 0,461.$$

Удельный расход пара

$$d = \frac{1}{i_{21} \text{ дж/кг}} \text{ кз/дж} = \frac{10^3}{314 \cdot 4,1868} = 0,762 \text{ кз/Мдж} =$$

$$= 0,762 \cdot 3,6 = 2,74 \text{ кз/квт} \cdot \text{ч}.$$

Термический к. п. д. цикла без регенерации (цикла Рэнкина)

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'} = \frac{345}{804} = 0,429.$$

Удельный расход пара для этого цикла

$$d = \frac{1}{i_{21} \text{ дж/кг}} \text{ кз/дж} = \frac{10^3}{345 \cdot 4,1868} =$$

$$= 0,693 \text{ кз/Мдж} = 2,49 \text{ кз/квт} \cdot \text{ч}.$$

Экономия, получаемая в результате введения регенеративного подогрева,

$$100\Delta\eta/\eta_t = \frac{\eta_{t, p} - \eta_t}{\eta_t} 100 = \frac{0,461 - 0,429}{0,429} \cdot 100 = 7,5\%.$$

14-28. В установке, описанной в задаче 14 27, поверхностные подогреватели заменены на смешивающие.

Определить термический к. п. д. регенеративного цикла, экономию за счет введения регенеративного подогрева и часовой расход топлива, если мощность турбины  $N = 50 \text{ Мвт}$ , к. п. д. котла  $\eta_{к\gamma} = 0,90$ , теплота сгорания топлива  $Q_R^p = 28\,000 \text{ кдж/кг}$ , а остальные условия те же, что и в задаче 14-27.

Ответ:  $\eta_{t, p} = 0,467$ ;  $100\Delta\eta/\eta_t = 8,9\%$ ;  $B = 15,3 \text{ т/ч}$ .

14-29 \*. Как известно из общей теории регенеративных циклов, для каждого числа  $n$  регенеративных отборов существует наилучшей термодинамической температурой регенеративного подогрева, растущая с увеличением числа отборов.

В реальных, с конечным числом отборов, установках повышение температуры питательной воды сверх термодинамически наилучшей приводит к увеличению внутренней необратимости в теплообменниках, а тем самым к снижению к. п. д. цикла вместо дальнейшего его повышения. Иными словами, при фиксированном числе отборов  $n$  температуру регенеративного подогрева целесообразно увеличивать только до такой величины, при которой выигрыш

\* Условия заимствованы из [Л. 14].



от уменьшения внешней необратимости цикла компенсирует увеличение внутренней необратимости в теплообменниках, так как только при этих условиях к. п. д. регенеративного цикла при данном  $n$  будет максимальным.

Определить наивыгоднейшую температуру питательной воды и максимально возможный к. п. д. регенеративного цикла при параметрах:  $p_1=90 \text{ кг/см}^2$ ,  $t_1=480^\circ \text{C}$ ,  $p_2=0,04 \text{ кг/см}^2$  и числе отборов  $n=5$ .

### Решение

Наивыгоднейшая температура в первом приближении может быть определена по соотношению [Л. 14]:

$$(\theta_n)_I^{\text{наив}} = \sqrt[n+1]{T_2 T_{1,K}^n}, \text{ } ^\circ \text{K},$$

где  $n$  — число отборов;

$T_2$ ,  $^\circ \text{K}$  — температура конденсата при  $p_2$ ;

$T_{1,K}$ ,  $^\circ \text{K}$  — верхняя температура цикла Карно, равновеликого по к. п. д. с рассматриваемым циклом,

$$T_{1,K} = \frac{T_2}{1 - \eta_{I,p}^{\text{макс}}};$$

$\eta_{I,p}^{\text{макс}}$  — максимально возможный при данном числе отборов к. п. д. Решение проводим по таблицам и  $i$ -с-диаграмме. В качестве первого приближения примем, что  $T_{1,K} = T_{s,1}$ , т. е. температуре насыщения при давлении  $p_1 = 90 \text{ кг/см}^2$ .  $T_{1,K} = T_{s,1} = 575,1^\circ \text{K}$ . Отсюда

$$(\theta_n)_I^{\text{наив}} = \sqrt[n+1]{T_2 T_{s,1}^n} = \sqrt[6]{301,8 \cdot 575,1^5} = 516,5^\circ \text{K}.$$

Здесь

$$T_2 = t_2 + 273,15 = 28,64 + 273,15 = 301,8^\circ \text{K}.$$

Определим к. п. д. в первом приближении по формуле, полученной в [Л. 14]:

$$(\eta_{I,p})_I^{\text{макс}} = 1 - \frac{(s_1 - s'_2) - n(1 - \sqrt[n]{T_2/\theta_n})}{i_1 - (i_{0,v} + t_{пв})} T_2,$$

где  $s_1 - s'_2$  — разность энтропий, соответственно взятых при параметрах  $p_1$ ,  $t_1$  и  $p_2$ ;  $i_{0,v}$  — энтальпия воды при  $p_1$  и  $t=0^\circ \text{C}$ ;  $t_{пв}$ ,  $^\circ \text{C}$  — температура питательной воды. По таблицам определяем  $s_1 - s'_2 = 1,4774 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ \text{K}$ ;  $i_1 = 796,7 \text{ ккал/кг}$ ;  $t_{0,v} = 2,2 \text{ ккал/кг}$ ;  $t_{пв} = (\theta_n)_I^{\text{наив}} - 273,2 = 243,3^\circ \text{C}$ .

$$(\eta_{I,p})_I^{\text{макс}} = 1 - \frac{1,4774 - 5 \left( 1 - \sqrt[5]{\frac{301,8}{516,5}} \right)}{796,7 - (2,2 + 243,3)} 301,8 = 1 - 0,529 = 0,4710.$$

Определим наимыгоднейшую температуру во втором приближении по точной формуле [Л. 14]:

$$(\theta_n)_{\text{наиб}} = \frac{T_2}{[1 - (\eta_{i,p})_{\text{макс}}]^{\frac{n}{n+1}}} = \frac{301,8}{(1 - 0,4710)^{5/6}} = 513,1^\circ \text{ К.}$$

Проверяем правильность выбора к. п. д. по приближенной температуре  $T_{1,k}$ , т. е. определяем к. п. д. во втором приближении

$$(\eta_{i,p})_{\text{макс}} = 1 - \frac{1,4774 - 5 \left( 1 - \sqrt[5]{\frac{301,8}{513,1}} \right)}{796,7 - (2,2 + 240,0) \cdot 301,8} = 0,4710.$$

Таким образом, значения  $\theta_n^{\text{наиб}} = 240^\circ \text{ С}$  и  $\eta_{i,p}^{\text{макс}} = 0,471$  являются окончательными.

**14-30.** Определить наимыгоднейшую температуру регенеративного подогрева питательной воды, если установка имеет три отбора, а начальные и конечные параметры:  $p_1 = 130 \text{ кг/см}^2$ ;  $t_1 = 540^\circ \text{ С}$ ;  $p_2 = 0,04 \text{ кг/см}^2$ .

Ответ.  $\theta_n^{\text{наиб}} = 244,7^\circ \text{ С}$ .

**14-31.** Теплофикационная турбина с противодавлением работает с входными параметрами пара  $p_1 = 90 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1 = 535^\circ \text{ С}$ . Противодавление  $p_2 = 3 \text{ кг/см}^2$ . Отработанный пар отправляется на производство и полностью возвращается на ТЭЦ в виде конденсата с энтальпией  $i_k = 400 \text{ кДж/кг}$ . Внутренний относительный к. п. д. турбины  $\eta_{ot} = 0,85$ .

Пренебрегая прочими потерями, определить величину выработки электрической энергии на единицу отданного потребителю тепла.

Ответ:  $\xi = 0,302 \text{ Дж эл. эн/Дж тепла} = 0,351 \text{ кВт} \cdot \text{ч/Мкал}$

**14-32.** На ТЭЦ установлена турбина ПТ-12-35,10 мощностью  $N = 12000 \text{ кВт}$ , в которой работает пар с начальными параметрами  $p_1 = 35 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1 = 435^\circ \text{ С}$ . Турбина имеет два отбора. Первый — производственный при  $p_1^0 = 10 \text{ кг/см}^2$ , величина отбора  $D_1^0 = 50 \text{ т/ч}$ . Второй — теплофикационный при  $p_2^0 = 1,2 \text{ кг/см}^2$ .  $D_2^0 = 40 \text{ т/ч}$ .

Определить часовой расход пара через турбину, если известны: относительный внутренний к. п. д.  $\eta_{ot} = 0,80$ ; механический к. п. д.  $\eta_m = 0,95$  и к. п. д. электрогенератора  $\eta_r = 0,98$ .

Ответ:  $D = 99,1 \text{ т/ч}$ .

**14-33.** Определить часовой расход топлива для установки с турбиной, описанной в задаче 14-32, если к. п. д. котельного агрегата  $\eta_{ку} = 0,90$ , теплота сгорания топлива  $Q_H^p = 30000 \text{ кДж/кг}$  и температура питательной воды  $t_{пв} = 120^\circ \text{ С}$ .

Каков был бы суммарный часовой расход топлива, если бы выработка энергии производилась раздельно: электроэнергия — на конденсационной станции (с теми же параметрами пара, что и на ТЭЦ) и тепла — в отопительной котельной. Коэффициент полезного действия всех котлов,  $\eta_{ку} = 0,90$ ; температура возвращаемого полностью конденсата равна  $t_k = 60^\circ \text{ С}$ .

Ответ: Часовой расход топлива на ТЭЦ  $B=10,22$  т/ч; на конденсационной станции  $B_k=4,96$  т/ч; в отопительной котельной  $B_{от}=8,77$  т/ч. Экономия топлива за счет введения теплофикации составляет  $B_k+B_{от}-B=3,51$  т/ч.

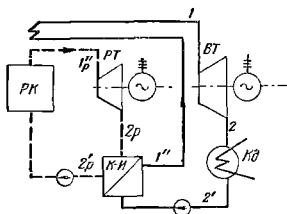


Рис. 14-8. К задаче 14-34.

РК — ртутный котел; РТ — ртутная турбина; К-И — конденсатор-испаритель; ВТ — пароводяная турбина; КД — конденсатор.

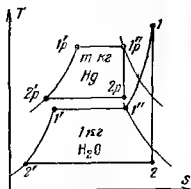


Рис. 14-9. К задаче 14-34.

14-34. Бинарная ртутно-водяная установка работает по схеме рис. 14-8. Ртутный котел вырабатывает сухой насыщенный пар давления  $p_1^0 = 9$  кг/см<sup>2</sup>, который направляется в ртутную турбину; отработанный пар давления  $p_2^0 = 0,06$  кг/см<sup>2</sup> идет в конденсатор-

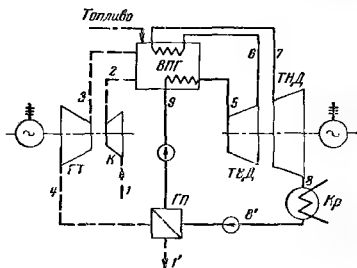


Рис. 14-10. К задаче 14-35.

испаритель, где отдает тепло конденсации воде, подаваемой насосом из конденсатора пароводяной турбины. При этом вода превращается также в сухой насыщенный пар, который перегревается в пароперегревателе, установленном в газоходах ртутного котла,

и направляется в пароводяную турбину. Параметры водяного пара:  $p_1 = 25 \text{ кг/см}^2$ ;  $t_1 = 520^\circ \text{C}$ ; давление в конденсаторе  $p_2 = 0,04 \text{ кг/см}^2$ .

Определить термический к. п. д. бинарного цикла (рис. 14-9) и его отношение к термическому к. п. д. цикла Карно, осуществляемого в тех же пределах максимальной и минимальной температур.

Ответ:  $\eta_t = 0,557$ ;  $\eta_{t, \text{к}} = 0,620$ ;  $\eta_t : \eta_{t, \text{к}} = 0,90$ .

14-35. Парогазовая установка работает по следующей схеме (рис. 14-10): воздух из атмосферы (состояние 1) сжимается ком-

прессором К (состояние 2) и подается в точное устройство высоконапорного парогенератора ВПГ, где сгорает топливо. Продукты сгорания сначала передают часть своего тепла нагревотой до температуры кипения воде и водяному пару, циркулирующим в особом контуре, а затем направляются в газовую турбину ГТ (состояние 3), в которой, адиабатически расширившись, совершают полезную работу. Отработавшие газы (состояние 4) идут в газовый подогреватель ГП и нагревают в нем конденсат водяного пара до температуры кипения (состояние 9), после чего выбрасываются в атмосферу (состояние 1').

Кипящая вода из подогревателя ГП направляется в парогенератор ВПГ, где испаряется и перегревается (состояние 5). Перегретый пар, отработав в турбине высокого давления ТВД (состояние 6), снова перегревается за счет тепла топочных газов ВПГ (состояние 7), затем работает в турбине низкого давления ТНД (состояние 8), после чего конденсируется в конденсаторе Кр. Водяной цикл, таким образом, замыкается. Идеальный бинарный цикл этой установки изображен на рис. 14-11.

Рассчитать термический к. п. д. идеального бинарного парогазового цикла, если известны следующие параметры:

Газ:  $p_1 = 0,981 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ;  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ ;  $t_3 = 800^\circ \text{C}$ ;  $t_{1'} = 120^\circ \text{C}$ ;  $\beta = p_2/p_1 = 8$ .

Вода и водяной пар:  $p_5 = 127,5 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ;  $t_5 = 565^\circ \text{C}$ ;  $p_6 = p_7 = 29,4 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ;  $t_7 = 565^\circ \text{C}$ ;  $p_8 = 0,0392 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

Найти отношение этого к. п. д. к к. п. д. цикла Карно для максимальной и минимальной температур бинарного цикла.

Газ считать обладающим свойствами воздуха. Теплоемкость газа  $c_p$  считать не зависящей от температуры. Работой водяных насосов пренебречь.

### Решение

Прежде всего определяем «недостающие» температуры в точках 2 и 4 газового цикла.

$$T_2 = T_1 \beta^{\frac{k-1}{k}} = 293 \frac{1,1-1}{1,1} = 531^\circ \text{K};$$

$$T_4 = T_3 \frac{T_1}{T_2} = 1073 \frac{293}{531} = 592^\circ \text{K}.$$

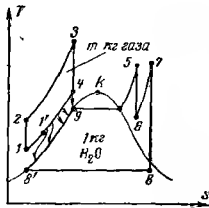


Рис. 14-11. К задаче 14-35

Из баланса тепла в ГП определяем кратность газа по отношению к воде, т. е. количество килограммов газа, приходящегося на 1 кг воды. Тепловой баланс записывается:

$$m(i_4 - i_{1'}) - i_9 - i_{8'}.$$

Откуда

$$m = \frac{i_9 - i_{8'}}{i_4 - i_{1'}} = \frac{i_9 - i_{8'}}{c_p(T_4 - T_{1'})} = \frac{363,4 - 28,7}{0,240(592 - 393)} = 7,008 \frac{\text{кг газа}}{\text{кг} \cdot \text{H}_2\text{O}}.$$

Здесь энтальпии  $i_9$  и  $i_{8'}$ , ккал/кг, найдены из таблиц [Л. 4] соответственно при  $p_9 = 127,5 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2 = 130 \text{ кг/см}^2$ ;  $t_9 = 565^\circ \text{С}$  и  $p_{8'} = p_9 = 0,0392 \cdot 10^6 \text{ н/м}^2 = 0,04 \text{ кг/см}^2$ .

Термический к. п. д. бинарного цикла

$$\begin{aligned} \eta_t &= \frac{m[(i_3 - i_1) + (i_2 - i_1)] + (i_5 - i_6) + (i_7 - i_8)}{m(i_3 - i_2) + (i_5 - i_6) + (i_7 - i_8)} = \\ &= \frac{7,008[0,240(1073 - 592) - 0,240(531 - 233)] +}{7,008 \cdot 0,240(1073 - 531) + (838,3 - 363,4) +} \\ &\quad \frac{+ (838,3 - 731,6) + (860,7 - 533,7)}{+ (860,7 - 731,6)} = 0,556. \end{aligned}$$

Энтальпии воды и водяного пара  $i_3$ ,  $i_7$ ,  $i_9$  найдены по таблицам при заданных параметрах, а  $i_6$ ,  $i_8$  получены в результате расчета изоэнтропических процессов. Теплоемкость газа  $c_p = \frac{1,986 \cdot 7}{2 \cdot 28,96} = 0,240 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{град}$ .

Коэффициент полезного действия цикла Карно

$$\eta_{t,K} = 1 - T_8/T_3 = 1 - 302/1073 = 0,719.$$

Отношение

$$\eta_t/\eta_{t,K} = 0,556/0,719 = 0,77.$$

14-35. Парогазовая установка осуществлена по схеме рис 14-10 с рабочими телами, имеющими те же параметры в основных точках цикла, что и в задаче 14-35

Рассчитать внутренний к. п. д. действительного цикла ПГУ (рис. 14-12), если дополнительно известны: внутренние относительные к. п. д. компрессора и газовой турбины  $\eta_{oi}^K = 0,85$  и  $\eta_{oi}^T = 0,87$ , внутренний относительный к. п. д. пароводяных турбин  $\eta_{oi}^{BT} = 0,85$ . Известно также, что в газовом подогревателе ГП вода нагревается до  $t_{10} = 300^\circ \text{С}$ , а газ охлаждается до  $t_{1'} = 120^\circ \text{С}$ .

Ответ:  $\eta_t = 0,440$ .

14-37. Рассчитать внутреннюю мощность (на лопатках турбин) парогазовой установки, описанной в задачах 14-35 и 14-36, если известно, что часовой расход водяного пара через турбины составляет  $D_v = 40 \text{ т/ч}$ .

Ответ:  $N_i = 24,3 \text{ Мвт}$ .

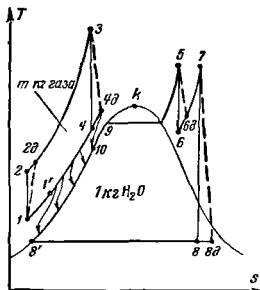


Рис 14-12 К задаче 14-36.

## 15. ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

15-1. Воздушная холодильная машина должна обеспечить температуру в охлаждаемом помещении  $t_{охл} = -5^\circ \text{C}$  при температуре окружающей среды  $t_0 = 20^\circ \text{C}$ .

Холодопроизводительность машины  $200\,000 \text{ ккал/ч}$ . Давление воздуха на выходе из компрессора  $p_2 = 5 \text{ кг/см}^2$ ; в холодильной камере  $p_1 = 1 \text{ кг/см}^2$ .

Определить мощность двигателя для привода машины, расход воздуха, холодильный коэффициент и количество тепла, передаваемое окружающей среде. Подсчитать холодильный коэффициент машины, работающей по циклу Карно в том же интервале температур. Представить цикл в  $Ts$ -диаграмме.

Ответ:  $N = 136 \text{ кВт}$ ;  $m = 10\,000 \text{ кг/ч}$ ;  $\epsilon = 1,7$ ;  $\epsilon_K = 10,7$ ,  $Q_1 = 316\,800 \text{ ккал/ч}$ .

15-2. Определить мощность двигателя холодильной машины, если температура охлаждаемого помещения  $t_{охл} = -10^\circ \text{C}$ , окружающей среды  $t_0 = 23^\circ \text{C}$  при холодопроизводительности  $150\,000 \text{ ккал/ч}$ . Максимальное давление воздуха  $p_2 = 5 \text{ кг/см}^2$ ,  $p_1 = 1 \text{ кг/см}^2$ . Представить цикл в  $Ts$ -диаграмме.

Ответ:  $N = 97 \text{ кВт}$ .

15-3. Воздушная холодильная машина производит лед при температуре  $-3^\circ \text{C}$  из воды с температурой  $10^\circ \text{C}$ . Всасываемый в компрессор воздух имеет температуру  $t_1 = -10^\circ \text{C}$ , давление  $p_1 = 0,98 \cdot 10^6 \text{ н/м}^2$  и сжимается до давления  $p_2 = 3,92 \cdot 10^6 \text{ н/м}^2$ . Посту-

пая в холодильник, воздух охлаждается до  $t=20^{\circ}\text{C}$ . Расход воздуха равен  $1\,000\text{ м}^3/\text{ч}$

Определить холодильный коэффициент  $\epsilon$ , мощность, потребляемую для привода компрессора, и количество полученного в час льда.

### Решение

Определим температуры воздуха  $T_2$  после сжатия в компрессоре и  $T_4$  — после расширения в цилиндре детандера (расширительного цилиндра):

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 263 \left( \frac{3,92}{0,98} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 373^{\circ}\text{K};$$

$$T_4 = T_2 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 203 \left( \frac{0,98}{3,92} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 206,5^{\circ}\text{K}.$$

Для того чтобы  $1\text{ кг}$  воды при температуре  $10^{\circ}\text{C}$  превратить в лед при температуре  $-3^{\circ}\text{C}$ , необходимо отнять от нее, во-первых, тепло  $q_1$ , идущее на охлаждение воды до  $0^{\circ}\text{C}$  и равное  $q_1 = c_p(t_2 - t_1) = 1 \cdot 10\text{ ккал/кг}$ ; во-вторых, — теплоту плавления льда  $q_2 = 79\text{ ккал/кг}$ , в-третьих, — тепло  $q_3 = c_{\text{л}}(t_1 - t_2) = 0,5[0 - (-3)] = 1,5\text{ ккал/кг}$ , отнимаемое для того, чтобы понизить температуру льда от  $0$  до  $-3^{\circ}\text{C}$ . ( $c_{\text{л}}$  — теплоемкость льда)

Общее количество тепла  $q$ , которое необходимо отнять у воды, равно.

$$q = 10 + 79 + 1,5 = 90,5\text{ ккал/кг}.$$

Часовой запас холода в воздухе равен:

$$Q_0 = V_0 c_p (t_1 - t_4) = 1\,000 \cdot 0,31(263,0 - 206,5) = 17\,500\text{ ккал/ч}.$$

Часовое количество полученного в холодильной установке льда

$$G = \frac{17\,500}{90,5} = 193\text{ кг/ч}.$$

Холодильный коэффициент

$$\epsilon = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{263}{373 - 263} = 2,39.$$

$$\text{Работа } L = \frac{Q_0}{\epsilon} = \frac{17\,500}{2,39} = 7\,320\text{ ккал/ч}.$$

$$\text{Искомая мощность } N = \frac{7\,320}{860} = 8,5\text{ квт}.$$

15-4. Воздушная холодильная машина производит в час  $198\text{ кг}$  льда при температуре  $-6^{\circ}\text{C}$  из воды с температурой  $12^{\circ}\text{C}$ . Воздух в компрессоре сжимается от давления  $p_1 = 0,98 \cdot 10^5\text{ н/м}^2$  до  $p_2 = 4,9 \cdot 10^5\text{ н/м}^2$  и  $t_2 = 140^{\circ}\text{C}$ . Сжатый воздух охлаждается в холодильнике до  $30^{\circ}\text{C}$ .

Определить часовой расход воздуха и потребную на машину мощность.

Ответ:  $m_{\text{возд}} = 1110 \text{ кг/ч}$ ;  $N = 12,2 \text{ кВт}$ .

15-5. Воздушная холодильная установка имеет холодопроизводительность  $200\,000 \text{ ккал/ч}$ . Параметры воздуха на выходе из холодильной камеры  $p_1 = 1 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1 = -3^\circ \text{С}$ . После сжатия воздух имеет давление  $4 \text{ кг/см}^2$ , температура окружающей среды  $20^\circ \text{С}$ .

Определить температуру воздуха после расширения, мощность компрессора и детандера, холодильный коэффициент. Определить холодильный коэффициент обратного цикла Карно в том же интервале температур.

Ответ:  $T_4 = 197^\circ \text{К}$ ;  $N_{\text{к}} = 418 \text{ кВт}$ ;  $N_{\text{дет}} = 305 \text{ кВт}$ ;  $\varepsilon = 2,16$ ;  $\varepsilon_{\text{к}} = 11,7$ .

15-6. Паровая компрессорная холодильная установка, схема которой представлена на рис. 15-1, в качестве рабочего тела исполь-

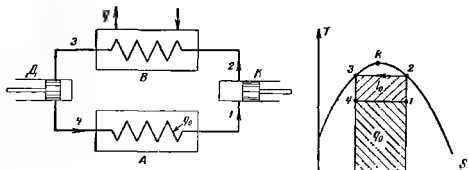


Рис 15-1. К задаче 15-6.

зует углекислоту. Компрессор  $K$  всасывает насыщенный пар и адиабатически сжимает его, превращая в сухой насыщенный пар давления, соответствующего температуре конденсации  $t_2 = 20^\circ \text{С}$ . Из компрессора углекислота поступает в конденсатор  $B$ , где при постоянном давлении превращается в жидкость, после чего расширяется в расширительном цилиндре  $D$  до давления, соответствующего температуре испарения  $t_1 = 10^\circ \text{С}$ , при этой же температуре углекислота поступает в охлаждаемое помещение, где, забирая теплоту от охлаждаемого тела, испаряется, образуя влажный пар со степенью сухости  $x_1$ .

Определить удельную холодопроизводительность холодильной установки, тепло, отданное в конденсаторе, работу, затраченную в цикле, и холодильный коэффициент.

### Решение

Удельная холодопроизводительность установки, т. е. количество теплоты, поглощаемое  $1 \text{ кг}$  углекислоты в охлаждаемом помещении, равна:

$$q_0 = i_1 - i_4 - r_1(x_1 - x_2), \text{ ккал/кг.}$$

По табл. 25 приложений находим при  $t_1 = -10^\circ \text{С}$  величину  $r_1 = 62,5 \text{ ккал/кг}$ .

Значения  $x_1$  и  $x_2$  определяем при помощи таблиц по формуле

$$s_2 = s_1 = s'_1 + (s''_1 - s'_1)x_1.$$



По табл. 25 имеем:  $s'_1 = 0,9737 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{К}$ ;  $s''_1 = 1,2163 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{К}$   
 $s''_2 = 1,1734 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{К}$ . Следовательно,

$$x_1 = \frac{s''_2 - s'_1}{s''_1 - s'_1} = \frac{1,1734 - 0,9737}{1,2163 - 0,9737} = 0,821.$$

В точке 4 определяется степень сухости  $x_4$ :

$$x_4 = \frac{s'_4 - s'_1}{s''_1 - s'_1} = \frac{1,0468 - 0,9737}{1,2163 - 0,9737} = 0,288.$$

Следовательно, отданное в конденсаторе тепло

$$q = i_2 - i_3 = r_2$$

Согласно табл. 25 при  $t = 20^\circ \text{C}$ ,  $r_2 = q = 37,1 \text{ ккал/кг} = 155,3 \text{ кДж/кг}$ .

Удельная холодопроизводительность  $q_0$  равна:

$$q_0 = 62,5(0,821 - 0,288) = 33,2 \text{ ккал/кг} = 139,0 \text{ кДж/кг}.$$

Работа, затраченная в цикле, равна

$$l = q - q_0 = 37,1 - 33,2 = 3,9 \text{ ккал/кг} = 16,3 \text{ кДж/кг}.$$

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l} = \frac{139,0}{16,3} = 8,53.$$

15-7. Компрессор  $K$  холодильной установки всасывает пары фреона-12 при  $t_1 = -15^\circ \text{C}$  и степени сухости  $x_1 = 0,92$  и адиабати-

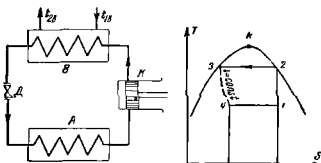


Рис. 15.2. К задаче 15-7.

чески сжимает их до давления, при котором его температура  $t_2 = 30^\circ \text{C}$  и сухость  $x_2 = 1$ . Из компрессора фреон-12 поступает в конденсатор  $B$  (рис. 15-2), где охлаждается водой с температурой на входе  $t_{1в} = 12^\circ \text{C}$ , а на выходе  $t_{2в} = 20^\circ \text{C}$ . В дроссельном вентиле  $D$  жидкий фреон-12 дросселируется до состояния влажного насыщенного пара, после чего направляется в испаритель  $A$ , из которого выходит со степенью сухости  $x_1 = 0,92$ . Теплота, необходимая для испарения фреона-12, подводится из охлаждаемой камеры.

Определить теоретическую мощность двигателя холодильной установки, часовой расход фреона-12 и охлаждающей воды, если холодопроизводительность установки  $Q_0 = 50\,000$  ккал/ч.

Ответ:  $N_{\text{теор}} = 18,5$  кВт;  $m_{\text{фр}} = 1,990$  кг/ч;  $m_w = 8\,230$  кг/ч.

15-8. Компрессор аммиачной холодильной установки имеет теоретическую мощность 40 кВт. Из компрессора сухой насыщенный

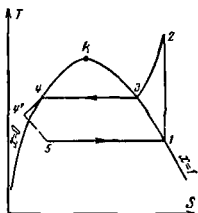


Рис. 15-3. К задаче 15-9

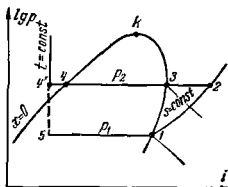


Рис. 15-4. К задаче 15-9

пар аммиака при температуре  $t_2 = 25^\circ\text{C}$  направляется в конденсатор, после которого жидкость в дроссельном вентиле расширяется. Температура испарения аммиака в охлаждаемой среде  $t_1 = -10^\circ\text{C}$ .

Определить холодопроизводительность установки.

Ответ:  $Q_0 = 980\,000$  кДж/ч

15-9. В паровых компрессорных холодильных установках замена расширительного цилиндра дроссельным вентилем приводит к снижению холодопроизводительности. Частично эта потеря может быть уменьшена путем переохлаждения жидкости ниже температуры конденсации (рис. 15-3). Как показано на рисунке, конденсат переохлаждается до температуры  $t_{4'}$ , лежащей ниже температуры конденсации  $t_4$ . Требуется определить холодильный коэффициент и теоретическую мощность двигателя холодильной машины, работающей на фреоне-12. Холодопроизводительность компрессора  $Q_0 = 140\,000$  ккал/ч. Температура испарения фреона 12  $t_1 = 15^\circ\text{C}$ , температура конденсации  $t = 30^\circ\text{C}$ , температура рабочего тела перед дроссельным вентилем  $t_{4'}$ ,  $25^\circ\text{C}$ .

Задачу решить, пользуясь диаграммой  $i$ -lg  $p$ .

Диаграмма  $i$ -lg  $p$  имеет много преимуществ, вследствие чего она часто употребляется при расчетах в холодильной технике: она позволяет определять в виде отрезков прямых характеристики рабочего процесса холодильных установок.

### Решение

На рис. 15-4 изображен цикл холодильной установки в  $i$ -lg  $p$  диаграмме.

Начальное состояние пара, поступающего в компрессор, определяется пересечением изобары  $p_1 = 1,86^* \text{ кг/см}^2$ , соответствующей

\* По табл. 27 приложений

температуре насыщения фреона  $t_1 = -15^\circ \text{C}$ , с кривой насыщения. Адиабатический процесс сжатия фреона в компрессоре изобразится линией 1-2 ( $s = \text{const}$ ), причем точка 2 получается в пересечении этой линии с изобарой  $p_2 = 7,58^*$ , соответствующей температуре насыщения фреона  $t_2 = 30^\circ \text{C}$ . Процесс конденсации изобразится линией 3-4, а процесс переохлаждения линией 4-4'. Процесс дросселирования условно изобразится линией 4'-5.

Из диаграммы  $i\text{-lg } p$  находим (рис. 15-5):

$i_1 = i''_1 = 135,3 \text{ ккал/кг}$ ;  $i_2 = 141,5 \text{ ккал/кг}$ . Принимая, что энтальпии переохлажденной жидкости равна энтальпии насыщенной жидкости при температуре  $25^\circ \text{C}$ , находим из диаграммы  $i'_4 = i_5 = 105,6 \text{ ккал/кг}$ .

Холодопроизводительность  $q_0$  равна  $q_0 = i_1 - i_5 = 135,3 - 105,6 = 29,7 \text{ ккал/кг} = 124,3 \text{ кДж/кг}$ .

Часовой расход фреона-12.

$$m_{\text{фр}} = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{140\,000}{29,7} = 4\,714 \text{ кг/ч.}$$

Теоретическая затрата работы в компрессоре:

$$l_{\text{к}} = i_2 - i_1 = 141,5 - 135,3 = 6,2 \text{ ккал/кг} = 26,0 \text{ кДж/кг.}$$

Теоретическая мощность двигателя холодильной машины

$$N_{\text{теор}} = \frac{m_{\text{фр}} l_{\text{к}}}{3\,600} = \frac{4\,714 \cdot 26,0}{3\,600} = 34 \text{ кВт.}$$

Холодильный коэффициент

$$\epsilon = \frac{q_0}{l_{\text{к}}} = \frac{124,3}{26,0} = 4,79.$$

15-10. Сравнить холодопроизводительность, холодильный коэффициент и теоретическую мощность двигателя холодильной установки, работающей без переохлаждения, с установкой, где производится переохлаждение конденсата. Компрессор всасывает сухой насыщенный пар фреона-12 при температуре  $-10^\circ \text{C}$  и сжимает его адиабатически до давления  $5,78 \text{ кг/см}^2$ . Пройдя через конденсатор и переохладитель, пар превращается в жидкость с температурой  $t = 10^\circ \text{C}$ . Холодопроизводительность  $Q_0 = 150\,000 \text{ ккал/ч}$ .

Решить задачу, пользуясь диаграммой  $i\text{-lg } p$ .

Ответ: без переохлаждения:  $q_0 = 131,0 \text{ кДж/кг}$ ;  $\epsilon = 7,82$ ,  $N_{\text{теор}} = 17,3 \text{ кВт}$ . С переохлаждением:  $q_0 = 141,9 \text{ кДж/кг}$ ;  $\epsilon = 8,6$ ;  $N_{\text{теор}} = 16 \text{ кВт}$ .

15-11. В аммиачной холодильной установке влажный пар аммиака при  $t_1 = -5^\circ \text{C}$  и  $x_1 = 0,95$  адиабатически сжимается до давления  $p_2 = 7,42$ , после чего поступает в конденсатор, где превращается в жидкость. В дальнейшем жидкость переохлаждается до  $t_3 = 10^\circ \text{C}$ .

После дросселирования пар подсушивается за счет отобранного из охлаждаемого объекта тепла и снова поступает в компрессор. Холодопроизводительность установки  $Q_0 = 220\,000 \text{ ккал/ч}$ .

Определить холодильный коэффициент и сравнить его с холодильным коэффициентом цикла Карио для того же интервала температур.

Ответ:  $\epsilon = 12,7$ ;  $\epsilon_{\text{К}} = 13,4$

\* По табл. 27 приложений

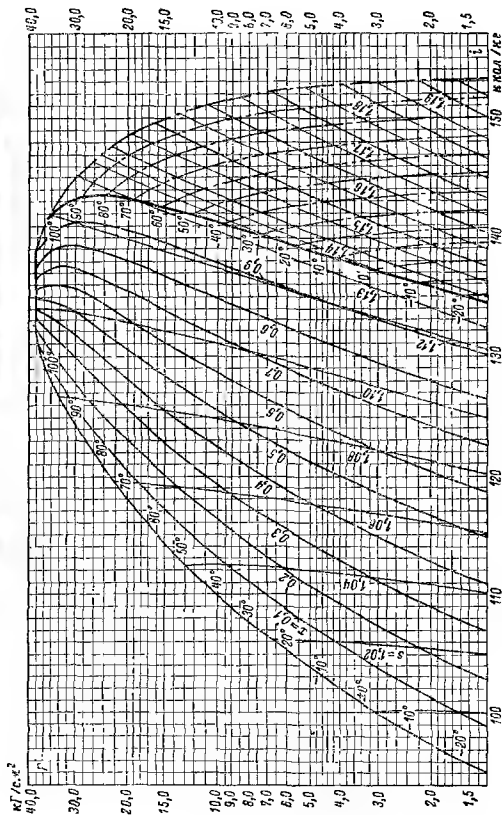


Рис 15.5 К задаче 15-9.

lg p-диаграмма для фреона-12 При  $t=0^\circ\text{C}$   $t'_0=100$  ккал/кг,  $s'_0=1.0$  ккал/кг  $^\circ\text{K}$

15-12. Для отопления зданий может быть использована холодильная установка, в которой нижним источником тепла служит окружающая среда. Этот принцип положен в основу работы теплового насоса. В результате его работы тепло передается источнику тепла с более высокой температурой, чем окружающая среда.

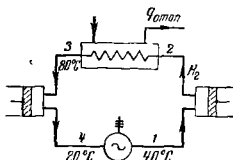


Рис 15.6 К задаче 15-13

Сколько можно получить тепла в час для отопления здания при помощи теплового насоса, если температура окружающей среды  $t_0 = -5^\circ\text{C}$ , температура нагревательных устройств  $t_n = 25^\circ\text{C}$ ? Мощность двигателя компрессора  $N = 15\text{ кВт}$ . Принять, что установка работает по циклу, изображенному на рис. 15-1. Холодильный агент — аммиак.

Ответ:  $Q = 185\,900\text{ кДж/ч}$

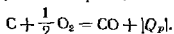
15-13. Современные электрогенераторы работают с применением водородного охлаждения. Циркулирующий в системе охлаждения водород может быть использован как рабочее вещество в схеме теплового насоса (рис 15-6). Каков отопительный коэффициент  $\mu = Q_{\text{отоп}}/N$  этой установки, если давление водорода в системе охлаждения генератора постоянно и равно  $p_1 = p_2 = 0,97 \cdot 10^6\text{ н/м}^2$ , а температуры в точках 1, 3 и 4 указаны на схеме? Каково давление водорода  $p_2$ , поступающего в теплообменник?

Теплоемкость  $c_p$  водорода считать не зависящей от температуры.

Ответ:  $\mu = 6,0$ ,  $p_2 = 1,86 \cdot 10^6\text{ н/м}^2$

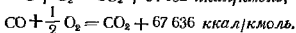
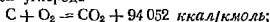
## 16. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕРМОДИНАМИКИ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

16-1. В газогенераторе большая часть углерода топлива сгорает неполностью с образованием окиси углерода и выделением некоторого количества тепла, согласно реакции:



В чистом виде провести эту реакцию, а следовательно, и найти величину  $Q_p$ , практически невозможно.

Определить тепловой эффект этой реакции ( $Q_p$ )<sub>298</sub> при стандартных условиях ( $p = 1\text{ атм физ}$ ,  $t = 25^\circ\text{C}$ ), если при этих же условиях известны тепловые эффекты реакций полного сгорания углерода и окиси углерода



Ответ.  $(Q_p)_{298} = \Delta H_{298}^{0*} = -26\,416\text{ ккал/кмоль}.$

\* В задачах этого раздела энтальпии, отнесенные к 1 кмоль, обозначаются символом  $H$ , т. е. так, как это принято в химической термодинамике.

Знак „минус“ показывает, что в результате реакции тепло выделяется и отводится в окружающую среду.

**16-2.** Определить стандартную теплоту образования  $(H_{298}^0)_{\text{CH}_4}^{\text{обр}}$  одного киломоля метана  $\text{CH}_4$ , если известны следующие стандартные теплоты:

а) сгорания метана

$$(\Delta H_{298}^0)_{\text{CH}_4}^{\text{сгор}} = -212\,798 \text{ ккал/кмоль};$$

б) образование жидкой  $\text{H}_2\text{O}$

$$(\Delta H_{298}^0)_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{обр}} (\text{ж}) = -68\,317 \text{ ккал/кмоль};$$

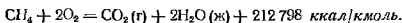
в) образования газообразной углекислоты

$$(\Delta H_{298}^0)_{\text{CO}_2(\text{г})}^{\text{обр}} = -94\,052 \text{ ккал/кмоль}$$

### Решение

Согласно следствию из закона Гесса тепловой эффект реакции равен алгебраической сумме теплот образования реагентов из простых веществ, т. е. сумме теплот образования продуктов реакции за вычетом суммы теплот образования исходных веществ

Запишем уравнение реакции сгорания метана:



Следовательно, по закону Гесса

$$\begin{aligned} -212\,798^{**} &= (\Delta H_{298}^0)_{\text{CO}_2(\text{г})}^{\text{обр}} + 2(\Delta H_{298}^0)_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{обр}} (\text{ж}) - \\ &\quad - (\Delta H_{298}^0)_{\text{CH}_4}^{\text{обр}} - 2(\Delta H_{298}^0)_{\text{O}_2}^{\text{обр}}. \end{aligned}$$

Подставив заданные величины и учитывая, что теплота образования  $\text{O}_2$  равна нулю, так как  $\text{O}_2$  есть простое вещество, получим:

$$-212\,798 = -94\,052 + 2(-68\,317) - (\Delta H_{298}^0)_{\text{CH}_4}^{\text{обр}} - 0;$$

$$(\Delta H_{298}^0)_{\text{CH}_4}^{\text{обр}} = 212\,798 - 94\,052 - 136\,634 = -17\,888 \text{ ккал/кмоль}.$$

**16-3.** Определить теплоту  $Q_p$  реакции сгорания этилена



если заданы теплоты образования реагентов:

$$\Delta H_{\text{C}_2\text{H}_4} = 12\,498, \Delta H_{\text{CO}_2} = -94\,052 \text{ и } \Delta H_{\text{H}_2\text{O}} = -68\,317 \text{ ккал/кмоль}.$$

**Ответ.**  $Q_p = -337\,236 \text{ ккал/кмоль } \text{C}_2\text{H}_4$ .

\*\* О знаке «минус» см в ответе предыдущей задачи.

16-4. Определить теплоту парообразования воды  $r$ , ккал/кг, если известны стандартные теплоты образования воды и пара, равные соответственно  $-68\,317$  и  $-57\,798$  ккал/кмоль.

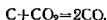
Сравнить с табличными (по таблицам водяного пара) значениями  $r$  при а)  $t_s = 25^\circ\text{C}$  и б)  $p_s = 1$  атм физ.

Ответ.  $r = 10\,519$  ккал/кмоль  $= 583,7$  ккал/кг. По таблицам водяного пара: а)  $r = 583,2$  ккал/кг; б)  $r = 539,0$  ккал/кг. Расхождение объясняется значительным отклонением свойств насыщенного водяного пара от свойств вещества в идеальном-газовом состоянии (стандартное условие). В случае а) расхождение невелико, а в случае б) велико потому, что энтальпии  $i'$  и  $i''$ , а следовательно, и  $r$ , достаточно сильно зависят от температуры  $t_s$ . При давлении же  $p_s = 1$  атм температура насыщения  $t_s = 100^\circ\text{C} > t_{\text{станд}} = 25^\circ\text{C}$ , следовательно,  $r_{100^\circ\text{C}} < r_{25^\circ\text{C}}$ .

16-5. Как различаются между собой теплоты реакций  $Q_v$  и  $Q_p$  для реакции  $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ ?

Ответ:  $Q_v = Q_p$ , так как в результате реакции число молей газообразных веществ не изменяется.

16-6. Определить разницу между  $Q_p$  и  $Q_v$  для реакции

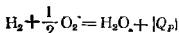


если она протекает при  $t = 0^\circ\text{C}$ . Считать, что  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  находятся в идеальном-газовом состоянии. Объемом твердого углерода пренебречь.

Можно ли пренебречь этой разницей, если точность определения теплот сгорания  $\text{C}$  и  $\text{CO}$  составляет соответственно  $\pm 10$  ккал/кмоль и  $\pm 29$  ккал/кмоль?

Ответ:  $Q_p - Q_v = -543$  ккал/кмоль. Пренебречь этой разностью нельзя, так как величина ее превышает точность определения теплот сгорания  $\text{C}$  и  $\text{CO}$ .

16-7. Определить тепловой эффект реакции



при температуре  $t = 1000^\circ\text{C}$ , если известно, что при  $t = 0^\circ\text{C}$   $|Q_p| = 68\,411$  ккал/кмоль.

Теплоемкость  $\mu_{c_p}$  считать зависящей от температуры и пользоваться таблицами.

Ответ:  $|Q_p| = 69\,897$  ккал/кмоль  $\text{H}_2\text{O}$ .

16-8. Вывести формулу для расчета степени диссоциации газа через константу равновесия для реакции диссоциации, происходящей по схеме:  $\text{X}_2 \rightleftharpoons 2\text{X}_1$  (диссоциация по такой схеме происходит, например, в парах щелочных металлов). При выводе формулы считать, что одноатомный и двухатомный газы являются идеальными.

$$\text{Ответ: } \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4p}{K_p}}}.$$

16-9. Для реакции  $\text{K}_2 \rightleftharpoons 2\text{K}_1$ , происходящей в парах калия, известна константа диссоциации при  $1100^\circ\text{C}$ :  $K_p = 76,261$  кг/см<sup>2</sup>.

Найти степень диссоциации паров калия при этой температуре при давлениях 3 и 7 кг/см<sup>2</sup>.

Ответ: Для 3 кг/см<sup>2</sup>  $\alpha=0,929$ ; для 7 кг/см<sup>2</sup>  $\alpha=0,855$ .

16-10. Для реакции диссоциации паров натрия  $\text{Na}_2 \rightleftharpoons 2\text{Na}$  при определенных параметрах известна степень диссоциации  $\alpha=0,83$ .

Чему равно отношение парциальных давлений одно- и двухатомного паров натрия?

### Решение

Отношения парциальных давлений равно отношению мольных долей  $r_1$  и  $r_2$ . Мольные доли находятся следующим образом. При диссоциации  $\alpha$  молей  $\text{Na}_2$  двухатомного пара остается  $1-\alpha$  молей, а одноатомного получается  $2\alpha$ . Всего молей в равновесном состоянии получается  $(1-\alpha)+2\alpha=1+\alpha$ . Значит мольные доли равны:

$$r_1 = \frac{2\alpha}{1+\alpha}; \quad r_2 = \frac{1-\alpha}{1+\alpha}.$$

Отношение мольных долей

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{2\alpha}{1-\alpha} = \frac{2 \cdot 0,83}{1-0,83} = 9,78,$$

т. е. при степени диссоциации, равной 0,83, парциальное давление одноатомных паров почти в 10 раз больше, чем двухатомных.

16-11. Вывести уравнение состояния для диссоциирующего идеального газа. Диссоциация идет по схеме  $\text{X}_2 \rightleftharpoons 2\text{X}_1$ .

### Решение

Реакция:  $\text{X}_2 \rightleftharpoons 2\text{X}_1$ .

Число молей:  $1-\alpha \quad 2\alpha$ .

Всего молей в состоянии равновесия:  $(1-\alpha)+2\alpha=1+\alpha$ .

Мольные доли:

$$r_1 = \frac{2\alpha}{1+\alpha}; \quad r_2 = \frac{1-\alpha}{1+\alpha}.$$

Масса моля смеси:

$$\mu_{\text{см}} = \sum r_i \mu_i = \frac{2\alpha}{1+\alpha} \mu_1 + \frac{1-\alpha}{1+\alpha} 2\mu_1$$

(здесь вместо  $\mu_2$  подставлено  $\mu_2 = 2\mu_1$ ).

Получаем:

$$\mu_{\text{см}} = \frac{2\mu_1}{1+\alpha} = \frac{\mu_2}{1+\alpha}.$$

Уравнение состояния (для 1 кг)

$$pV = \frac{8314}{\mu_{\text{см}}} T, \quad \text{или} \quad pV = \frac{8314T}{\mu_2} (1+\alpha).$$



Степень диссоциации можно выразить и через константу равновесия (см задачу 16-8).

16-12. Известно, что энтальпия обычного идеального газа от давления не зависит.

Зависит ли энтальпия диссоциирующего идеального газа от давления?

Ответ: Зависит. Доказать это можно, взяв производную  $(dH/dp)_T = [v - T(dv/dT)_p]$  с помощью уравнения состояния диссоциирующего идеального газа (задача 16-11).

16-13. Рассчитать константу равновесия  $K_p$  в стандартном состоянии при температуре 1000° С для реакции диссоциации, проходящей в парах калия ( $K_2 \rightleftharpoons 2K_1$ ), если известны энтальпии и энтропии одно- и двухатомных паров, а также теплота диссоциации (стандартные состояния).

Энтальпии при 1000 °С:  $(H^\circ - H^\circ_0)_1 = 6320,8$  ккал/кмоль;  
 $(H^\circ - H^\circ_0)_2 = 11645,6$  ккал/кмоль.

Энтропии при 1000° С:  $S^\circ_1 = 45,478$  ккал/кмоль·°К;  $S^\circ_2 = 73,064$  ккал/кмоль·°К.

Теплота диссоциации при 0°К:  $D^\circ_0 = 11\,842$  ккал/кмоль  $K_2$ .

#### Решение

Константа равновесия рассчитывается с помощью известной формулы

$$\ln K_p = - \frac{\Delta \Phi^\circ}{\mu RT},$$

где  $\Delta \Phi^\circ$  — изменение стандартных термодинамических потенциалов для рассчитываемой реакции. Эта формула может быть преобразована:

$$\begin{aligned} \ln K_p &= - \frac{2(\Phi^\circ - H^\circ_0)_1 + D^\circ_0 - (\Phi^\circ - H^\circ_0)_2}{\mu RT} = \\ &= - \frac{2(H^\circ - H^\circ_0)_1 - 2TS^\circ_1 + D^\circ_0 - (H^\circ - H^\circ_0)_2 + TS^\circ_2}{\mu RT}. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \ln K_p &= \\ &= - \frac{2 \cdot 6320,8 - 2 \cdot 1\,273 \cdot 45,478 + 11\,842 - 11645,6 + 1\,273 \cdot 73,064}{1,986 \cdot 1\,273} = \\ &= 3,9310. \end{aligned}$$

Отсюда  $K_p = 50,9$  атм.

16-14. Известно, что при температуре абсолютного нуля теплоты сублимации калия равны:

$(\Delta H^\circ_0)_1 = 21\,695$  ккал/кмоль  $K_1$  и  $(\Delta H^\circ_0)_2 = 31\,548$  ккал/кмоль  $K_2$ .

Первая цифра относится к такому процессу испарения, когда в результате него получается пар в виде одноатомных молекул калия, вторая цифра — то же для двухатомных молекул.

Определить теплоту диссоциации калия при  $T=0^\circ \text{ К}$ .

$$\text{Ответ. } D_0^0 = 2(\Delta H_0^0)_1 - (\Delta H_0^0)_2 - 21\,695 \cdot 2 - 31\,548 = \\ = 11\,842 \text{ ккал/кмоль} \cdot \text{К}_2.$$

16-15. Вывести формулу для расчета теплоемкости  $c_p$  диссоциирующих идеальных газов. Диссоциация идет по схеме



Рассчитать теплоемкость  $c_p$  паров калия при  $p=1 \text{ кг/см}^2$  и  $t=800^\circ \text{ С}$ . Известно, что при  $t=800^\circ \text{ С}$  молярные теплоемкости  $\mu c_p^0$  для одноатомных и двухатомных паров калия и энтальпии соответственно равны  $\mu c_{p,1}^0 = 4,9647 \text{ ккал/кмоль} \cdot \text{град}$ ;  $\mu c_{p,2}^0 = 9,484 \text{ ккал/кмоль} \cdot \text{град}$ ;  $(H^0 - H_0^0)_1 = 5327,9 \text{ ккал/кмоль}$ ;  $(H^0 - H_0^0)_2 = 9744,0 \text{ ккал/кмоль}$ ; степень диссоциации при этих параметрах равна  $\alpha = 0,9150$ , а теплоты сублимации при  $0^\circ \text{ К}$  даны в предыдущей задаче.

### Решение

Для вывода формулы теплоемкости необходимо написать выражение для энтальпии диссоциирующего газа. Используя обозначения для удельных энтальпий, обычно применяемые в технической термодинамике, получим для энтальпии 1 кг смеси паров  $\text{K}_1$  и  $\text{K}_2$

$$i = g_1 i_1 + g_2 i_2,$$

где  $i_1$ , ккал/кг и  $i_2$ , ккал/кг — массовые энтальпии  $\text{K}_1$  и  $\text{K}_2$ , отсчитанные от одного энергетического уровня;  $g_1$  и  $g_2$  — массовые доли. Их можно найти через молярные (объемные) доли.

$$g_1 = \frac{r_1 \mu_1}{r_1 \mu_1 + r_2 \mu_2} = \frac{\frac{2\alpha}{1+\alpha} \mu_1}{\frac{2\alpha}{1+\alpha} \mu_1 + \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \mu_2} = \alpha,$$

так как  $\mu_2 = 2\mu_1$ . Таким образом, получаем:

$$i = \alpha i_1 + (1 - \alpha) i_2.$$

Теплоемкость  $c_p$  получается дифференцированием:

$$c_p = \left( \frac{\partial i}{\partial t} \right)_p = \alpha \left( \frac{\partial i_1}{\partial t} \right)_p + i_1 \left( \frac{\partial \alpha}{\partial t} \right)_p + (1 - \alpha) \left( \frac{\partial i_2}{\partial t} \right)_p - i_2 \left( \frac{\partial \alpha}{\partial t} \right)_p,$$

или

$$c_p = \alpha c_{p1} + (1 - \alpha) c_{p2} + (i_1 - i_2) \left( \frac{\partial \alpha}{\partial t} \right)_p. \quad (1)$$

В этой формуле  $c_{p1}$  и  $c_{p2}$  — массовые теплоемкости паров одно- и двухатомного калия;  $(i_2 - i_1)$  — тепловой эффект реакции диссоциации, рассчитанный на 1 кг смеси.

Формула (1) имеет следующий физический смысл: первые два члена формулы дают аддитивные части теплоемкости смеси. Третий член связан с тем, что в процессе подвода тепла изменяется состав смеси  $\left[ \left( \frac{\partial \alpha}{\partial t} \right)_p \neq 0 \right]$  — увеличивается количество одноатомных молекул и значительное количество тепла идет на реакцию диссоциации.

Для расчета можно заменить величины, входящие в формулу (1), через стандартные:

$$c_{p1} = \frac{\mu c_{p1}^0}{\mu_1}, \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}; \quad c_{p2} = \frac{\mu c_{p2}^0}{\mu_2}, \text{ ккал/кг} \cdot \text{град};$$

$$i_1 = \frac{(H^0 - H_0^0)_1 + (\Delta H_0^0)_1}{\mu_1}, \text{ ккал/кг};$$

$$i_2 = \frac{(H^0 - H_0^0)_2 + (\Delta H_0^0)_2}{\mu_2}, \text{ ккал/кг}.$$

Энтальпии здесь отсчитаны от одного энергетического уровня. Учитывая, что  $\mu_1 = \mu_2/2$ , получим для теплового эффекта реакции диссоциации

$$\begin{aligned} \frac{\Delta H^0}{\mu_2} &= i_1 - i_2 = \\ &= \frac{1}{\mu_2} [2(H^0 - H_0^0)_1 + 2(\Delta H_0^0)_1 - (H^0 - H_0^0)_2 - (\Delta H_0^0)_2], \end{aligned} \quad (2)$$

где через  $\Delta H^0$  обозначен тепловой эффект реакции диссоциации в ккал/кмоль  $K_2$ . Величину производной  $(\partial \alpha / \partial t)_p$  находим из формулы  $\alpha = 1 / \sqrt{1 + \frac{4p}{K_p}}$ :

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial \alpha}{\partial t} \right)_p &= \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4p}{K_p}}} \right]_p = - \frac{4p}{2 \left( 1 + \frac{4p}{K_p} \right)^{3/2} K_p^2} \left( \frac{\partial K_p}{\partial T} \right)_p = \\ &= - \frac{\alpha (1 - \alpha^2)}{2} \left( \frac{\partial \ln K_p}{\partial T} \right)_p. \end{aligned}$$

Используя известное выражение зависимости константы равновесия от температуры

$$\left( \frac{\partial \ln K_p}{\partial T} \right)_p = \frac{\Delta H^0}{\mu R T^2},$$

получаем:

$$\left( \frac{\partial \alpha}{\partial t} \right)_p = \frac{\alpha (1 - \alpha^2)}{2} \cdot \frac{\Delta H^0}{\mu R T^2}.$$

Подставляя в формулу (1) полученные величины, находим:

$$c_p = \frac{2\mu c_{p1}^0}{\mu_2} \alpha + \frac{\mu c_{p2}^0}{\mu_2} (1 - \alpha) + \frac{\alpha (1 - \alpha^2)}{2} \cdot \frac{\Delta H^0}{\mu R T^2} \cdot \frac{\Delta H^0}{\mu_2}$$

или окончательно

$$c_p = \frac{1}{\mu_2} \left[ 2\alpha \mu c_{p1}^0 + (1 - \alpha) \mu c_{p2}^0 + \frac{\alpha (1 - \alpha^2)}{2\mu R} \left( \frac{\Delta H^0}{T} \right)^2 \right].$$

Теперь произведем расчет теплоемкости  $c_p$  для требуемых параметров. Предварительно вычислим

$$\begin{aligned} \Delta H^0 &= 2[(H^0 - H_0^0)_1 + (\Delta H_0^0)_1] - [(H^0 - H_0^0)_2 + (\Delta H_0^0)_2] = \\ &= 2(5327,9 + 21\,695) - (9744,0 + 31\,548) = 12\,754 \text{ ккал/кмоль} \cdot \text{К}_2. \end{aligned}$$

Величина

$$(\Delta H^0/T)^2 = \left( \frac{12\,754}{1073,15} \right)^2 = 141,0.$$

Теплоемкость рассчитывается:

$$\begin{aligned} c_p &= \frac{1}{78,2} \times \\ &\times \left[ 2 \cdot 0,915 \cdot 4,9647 + 0,085 \cdot 9,484 + \frac{0,915(1 - 0,915^2)}{2 \cdot 1,986} \cdot 141,0 \right] = \\ &= \frac{1}{78,2} (9,08 + 0,806 + 5,29) = 0,1942 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}. \end{aligned}$$

Как видно из расчета, третий член в формуле для теплоемкости  $c_p$  имеет существенное значение.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1

## Международная система единиц (СИ)

| Величина                                       | Единица измерения            | Сокращенное обозначение единиц               |
|------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|
| <i>Основные единицы</i>                        |                              |                                              |
| Длина                                          | метр                         | <i>м</i>                                     |
| Масса                                          | килограмм                    | <i>кг</i>                                    |
| Время                                          | секунда                      | <i>сек</i>                                   |
| Сила электрического тока                       | ампер                        | <i>а</i>                                     |
| Термодинамическая температура                  | градус Кельвина              | $^{\circ}\text{К}$                           |
| Сила света                                     | свеча                        | <i>св</i>                                    |
| <i>Некоторые производные единицы</i>           |                              |                                              |
| Площадь                                        | квадратный метр              | $\text{м}^2$                                 |
| Объем                                          | кубический метр              | $\text{м}^3$                                 |
| Скорость                                       | метр в секунду               | $\text{м/сек}$                               |
| Ускорение                                      | метр на секунду в квадрате   | $\text{м/сек}^2$                             |
| Сила                                           | ньютон                       | $\text{н}; (\text{кг} \cdot \text{м/сек}^2)$ |
| Давление                                       | ньютон на квадратный метр    | $\text{н/м}^2$                               |
| Удельный вес                                   | ньютон на кубический метр    | $\text{н/м}^3$                               |
| Плотность                                      | килограмм на кубический метр | $\text{кг/м}^3$                              |
| Удельный объем                                 | кубический метр на килограмм | $\text{м}^3/\text{кг}$                       |
| Работа, энергия, количество теплоты, энтальпия | джоуль                       | $\text{джс}; (\text{н} \cdot \text{м})$      |
| Мощность                                       | ватт                         | <i>вт</i>                                    |
| Энтропия                                       | джоуль на градус Кельвина    | $\text{джс/}^{\circ}\text{К}$                |
| Удельная массовая теплоемкость                 | джоуль на килограмм-градус   | $\text{джс/кг} \cdot \text{град}$            |
| Теплота фазового превращения                   | джоуль на килограмм          | $\text{джс/кг}$                              |

Некоторые внесистемные единицы

| Величина                                                                             | Единица измерения                | Сокращенное обозначение единиц |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Время                                                                                | час, сутки, год                  | ч                              |
| Количество теплоты, энтальпия, внутренняя энергия, изобарно-изотермический потенциал | калория                          | кал                            |
| Работа, энергия                                                                      | киловатт-час, лошадиная сила-час | квт.ч<br>л. с-ч                |
| Масса вещества в килограммах, численно равная его молекулярному весу                 | киломоль                         | кмоль                          |
| Давление                                                                             | миллиметры водяного столба;      | мм вод. ст.                    |
|                                                                                      | миллиметры ртутного столба       | мм рт. ст.                     |

Таблица 3

**Приставки для обозначения  
кратных и дольных единиц  
(ГОСТ 7663-55)**

| Кратность и<br>дольность | Наименование<br>приставок | Сокращен-<br>ное обо-<br>значение |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| $10^{12}$                | тера                      | Т                                 |
| $10^9$                   | гига                      | Г                                 |
| $10^6$                   | мега                      | М                                 |
| $10^3$                   | кело                      | к                                 |
| $10^2$                   | гекто                     | г                                 |
| 10                       | дека                      | да                                |
| $10^{-1}$                | деци                      | д                                 |
| $10^{-2}$                | сант                      | с                                 |
| $10^{-3}$                | милли                     | м                                 |
| $10^{-6}$                | микро                     | мк                                |
| $10^{-9}$                | нано                      | н                                 |
| $10^{-12}$               | пико                      | п                                 |

Таблица 4

Перевод некоторых величин, измеренных в единицах системы МКГСС или во внесистемных единицах, в единицы международной системы СИ

|                                                              |                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Масса . . . . .                                              | 1 т. е. м. = 1 кг·сек <sup>2</sup> /м — 9,80665 кг                                            |
| Сила . . . . .                                               | 1 кгГ = 9,80665 н                                                                             |
| Плотность . . . . .                                          | 1 т. е. м./м <sup>3</sup> = 1 кг·сек <sup>2</sup> /м <sup>3</sup> = 9,80665 кг/м <sup>3</sup> |
| Удельный вес . . . . .                                       | 1 кгГ/м <sup>3</sup> — 9,80665 н/м <sup>3</sup>                                               |
| Давление . . . . .                                           | 1 кгГ/м <sup>2</sup> — 9,80665 н/м <sup>2</sup>                                               |
| Работа . . . . .                                             | 1 кгГ·м = 1/426,94 ккал = 9,80665 дж                                                          |
| Теплота, энтальпия, внутренняя энергия, потенциалы . . . . . | 1 ккал = 1/859,845 квт·ч = 4,1868·10 <sup>3</sup> дж                                          |
| Мощность . . . . .                                           | 1 вт·ч = 3 600 дж                                                                             |

Таблица 5

Молекулярные веса, плотности и объемы киломолей при нормальных условиях, критические температуры и критические давления некоторых газов

|                                         | Химическое обозначение | Молекулярный вес $\mu$ | Плотность $\rho_v$ , кг/м <sup>3</sup> | Объем киломоля $V_v$ , м <sup>3</sup> | Критическая температура $T_{кр}$ , °К | Критическое давление $P_{кр}$ , кгГ/см <sup>2</sup> |
|-----------------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Воздух . . . . .                        | —                      | 28,96                  | 1,2928                                 | 22,40                                 | 132,5                                 | 38,4                                                |
| Гелий . . . . .                         | He                     | 4,003                  | 0,1785                                 | 22,42                                 | 5,30                                  | 2,25                                                |
| Аргон . . . . .                         | Ar                     | 39,944                 | 1,7839                                 | 22,39                                 | 150,8                                 | 52,9                                                |
| Водород . . . . .                       | H <sub>2</sub>         | 2,016                  | 0,08987                                | 22,43                                 | 33,29                                 | 12,80                                               |
| Азот . . . . .                          | N <sub>2</sub>         | 28,016                 | 1,2505                                 | 22,40                                 | 126,07                                | 33,5                                                |
| Азот атмосферный <sup>1</sup> . . . . . | N <sub>2, атм</sub>    | 28,16                  | (1,257)                                | (22,4)                                | —                                     | —                                                   |
| Кислород . . . . .                      | O <sub>2</sub>         | 32,0000                | 1,42895                                | 22,39                                 | 154,38                                | 50,8                                                |
| Хлор . . . . .                          | Cl <sub>2</sub>        | 70,914                 | 3,22                                   | 22,02                                 | 419,0                                 | 93,5                                                |
| Оксид углерода . . . . .                | CO                     | 28,01                  | 1,2500                                 | 22,40                                 | 133,6                                 | 35,5                                                |
| Двуокись углерода . . . . .             | CO <sub>2</sub>        | 44,01                  | 1,9768                                 | 22,26                                 | 304,2                                 | 75,29                                               |
| Сернистый газ . . . . .                 | SO <sub>2</sub>        | 64,06                  | 2,9263                                 | 21,89                                 | 430,1                                 | 78,3                                                |
| Аммиак . . . . .                        | NH <sub>3</sub>        | 17,032                 | 0,7714                                 | 22,08                                 | 403,7                                 | 114                                                 |
| Водяной пар <sup>2</sup> . . . . .      | H <sub>2</sub> O       | 18,016                 | (0,804)                                | (22,4)                                | 647,3                                 | 225,65                                              |

<sup>1</sup> Атмосферный азот — условный газ, состоящий из азота, редких газов и двуокиси углерода, содержащихся в воздухе.

<sup>2</sup> Водяной пар и азот атмосферный приводятся к нормальному состоянию; в этом случае плотность определяется как частное  $\mu/22,4$ , кг/м<sup>3</sup>.

Таблица 6

## Соотношения между единицами измерения давления

| Наименование единиц               | Ньютоны на квадратный метр, $\text{н/м}^2$ | Бары, $\text{бар}$      | Килограммы силы на квадратный метр, $\text{кг/м}^2$ | Килограммы-сила на кв. сантиметр (технические атмосферы), $\text{кг/см}^2; \text{ат}$ | Физические атмосферы, $\text{атм}$ | Миллиметры водяного столба, $\text{мм вод. ст.}$ | Миллиметры ртутного столба, $\text{мм рт. ст.}$ | Английские фунты на кв. дюйм, $\text{lb/sq.in.}$ |
|-----------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 1 $\text{н/м}^2$                  | 1                                          | $10^{-5}$               | 0,101972                                            | $1,01972 \cdot 10^{-3}$                                                               | $0,980665 \cdot 10^{-5}$           | 0,101972                                         | $730,06 \cdot 10^{-5}$                          | $14,5038 \cdot 10^{-5}$                          |
| 1 $\text{бар}$                    | $10^5$                                     | 1                       | 10197,2                                             | $1,01972 \cdot 10^{-4}$                                                               | 0,980665                           | 10197,2                                          | 750,06                                          | 14,5038                                          |
| 1 $\text{кг/м}^2$                 | 9,80665 $\cdot 10^4$                       | $9,80665 \cdot 10^{-5}$ | 1                                                   | $10^{-4}$                                                                             | 0,96784 $\cdot 10^{-4}$            | 104                                              | $735,55 \cdot 10^{-4}$                          | $14,2233 \cdot 10^{-4}$                          |
| 1 $\text{кг/см}^2 = 1 \text{ ат}$ | 0,980665 $\cdot 10^5$                      | 0,980665                | $1,03323 \cdot 10^4$                                | 1,03323                                                                               | 1                                  | $1,03323 \cdot 10^4$                             | 735,55                                          | 14,2233                                          |
| 1 $\text{атм}$ (физ.)             | $1,01325 \cdot 10^5$                       | 1,01325                 | $10^4$                                              | 1                                                                                     | 0,96784                            | $10^4$                                           | 760                                             | 14,6959                                          |
| $10^4 \text{ мм вод. ст.}$        | 0,980665 $\cdot 10^5$                      | 0,980665                | $1,03323 \cdot 10^4$                                | 1,03323                                                                               | 1                                  | $1,03323 \cdot 10^4$                             | 735,55                                          | 14,2233                                          |
| $10^3 \text{ мм вод. ст.}$        | $1,33322 \cdot 10^5$                       | 1,33322                 | $1,37551 \cdot 10^4$                                | 1,36951                                                                               | $1,31579 \cdot 10^4$               | $1,36951 \cdot 10^4$                             | $10^5$                                          | 19,3368                                          |
| $10 \text{ lb, sq.in.}$           | $0,68948 \cdot 10^5$                       | 0,68948                 | $0,70307 \cdot 10^4$                                | 0,70307                                                                               | 0,65046                            | $0,70307 \cdot 10^4$                             | 517,15                                          | 10                                               |

\* При  $t = 4^\circ \text{С}$  и нормальном ускорении силы тяжести  $g_n = 9,80665 \text{ м/сек}^2$ .\* При  $t = 0^\circ \text{С}$  и  $g_n = 9,80665 \text{ м/сек}^2$ .

Таблица 7

## Соотношение между единицами измерения энергии

| Единицы измерения              | Килоджоули, $\text{кДж}$ | Килокалории, $\text{ккал}$ | Киловатт-часы, $\text{кВт} \cdot \text{ч}$ | Килограммметры, $\text{кг} \cdot \text{м}$ | Лошадиные силы-часы, $\text{л.с.} \cdot \text{ч}$ |
|--------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 10 $\text{кДж}$                | 10,0000                  | 2,38846                    | 0,00277778                                 | 1019,72                                    | 0,0037767                                         |
| 10 $\text{ккал}$               | 41,868                   | 10                         | 0,011630                                   | 4269,4                                     | 0,015813                                          |
| 1 $\text{кВт} \cdot \text{ч}$  | 3600                     | 859,845                    | 1                                          | 367 098                                    | 1,35962                                           |
| 100 $\text{кг} \cdot \text{м}$ | 0,980665                 | 0,23423                    | 0,00027239                                 | 100                                        | 0,00037037                                        |
| 1 $\text{л.с.} \cdot \text{ч}$ | 2647,80                  | 632,41                     | 0,73550                                    | 270 000                                    | 1                                                 |



Азот N<sub>2</sub>

| Температура | Теплоемкость    |                 |                   |                   |                |                 |                  |                   | Энтальпия      |       | Энтродия       |        |
|-------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|----------------|-----------------|------------------|-------------------|----------------|-------|----------------|--------|
|             | μ <sub>ср</sub> | μ <sub>св</sub> | μ <sub>ср</sub> т | μ <sub>св</sub> т | с <sub>р</sub> | с <sub>св</sub> | с <sub>р</sub> т | с <sub>св</sub> т | μ <sub>г</sub> | i     | μ <sub>с</sub> | s      |
| °C          | ккал/кг·град    |                 |                   |                   |                |                 |                  |                   | ккал/кг        |       | ккал/кмоль·°K  |        |
| 0           | 6,954           | 4,968           | 6,954             | 4,968             | 0,2482         | 0,1773          | 0,2482           | 0,1773            | 0              | 0     | 0              | 0      |
| 100         | 6,974           | 4,988           | 6,961             | 4,975             | 0,2489         | 0,1780          | 0,2485           | 0,1776            | 696,1          | 24,85 | 2,171          | 0,0775 |
| 200         | 7,039           | 5,053           | 6,981             | 4,995             | 0,2512         | 0,1804          | 0,2492           | 0,1783            | 1396           | 49,84 | 3,833          | 0,1368 |
| 300         | 7,154           | 5,168           | 7,018             | 5,032             | 0,2554         | 0,1845          | 0,2505           | 0,1796            | 2105           | 75,15 | 5,193          | 0,1854 |
| 400         | 7,303           | 5,317           | 7,070             | 5,084             | 0,2607         | 0,1898          | 0,2524           | 0,1815            | 2828           | 100,1 | 6,355          | 0,2268 |
| 500         | 7,464           | 5,478           | 7,133             | 5,147             | 0,2664         | 0,1955          | 0,2546           | 0,1837            | 3567           | 127,3 | 7,377          | 0,2633 |
| 600         | 7,624           | 5,638           | 7,201             | 5,215             | 0,2721         | 0,2012          | 0,2570           | 0,1861            | 4321           | 154,2 | 8,294          | 0,2961 |
| 700         | 7,772           | 5,786           | 7,273             | 5,287             | 0,2774         | 0,2065          | 0,2595           | 0,1887            | 5091           | 181,7 | 9,129          | 0,3259 |
| 800         | 7,906           | 5,920           | 7,344             | 5,358             | 0,2822         | 0,2113          | 0,2621           | 0,1912            | 5875           | 209,7 | 9,896          | 0,3532 |
| 900         | 8,025           | 6,039           | 7,413             | 5,427             | 0,2864         | 0,2156          | 0,2646           | 0,1937            | 6672           | 238,1 | 10,606         | 0,3786 |
| 1000        | 8,130           | 6,144           | 7,479             | 5,493             | 0,2902         | 0,2193          | 0,2670           | 0,1961            | 7479           | 267,0 | 11,266         | 0,4021 |
| 1100        | 8,222           | 6,236           | 7,542             | 5,556             | 0,2935         | 0,2226          | 0,2692           | 0,1983            | 8296           | 296,1 | 11,885         | 0,4242 |
| 1200        | 8,303           | 6,317           | 7,592             | 5,616             | 0,2954         | 0,2255          | 0,2713           | 0,2005            | 9122           | 325,6 | 12,466         | 0,4449 |
| 1300        | 8,374           | 6,388           | 7,659             | 5,673             | 0,2989         | 0,2280          | 0,2734           | 0,2025            | 9957           | 355,4 | 13,013         | 0,4645 |
| 1400        | 8,436           | 6,450           | 7,713             | 5,727             | 0,3011         | 0,2302          | 0,2753           | 0,2044            | 10800          | 385,4 | 13,531         | 0,4830 |
| 1500        | 8,490           | 6,504           | 7,763             | 5,777             | 0,3030         | 0,2322          | 0,2771           | 0,2062            | 11640          | 415,7 | 14,022         | 0,5005 |
| 1600        | 8,538           | 6,552           | 7,810             | 5,824             | 0,3048         | 0,2339          | 0,2788           | 0,2079            | 12500          | 446,1 | 14,489         | 0,5172 |
| 1700        | 8,581           | 6,596           | 7,854             | 5,868             | 0,3063         | 0,2354          | 0,2803           | 0,2095            | 13350          | 476,5 | 14,935         | 0,5331 |
| 1800        | 8,620           | 6,634           | 7,895             | 5,909             | 0,3077         | 0,2368          | 0,2818           | 0,2109            | 14210          | 507,2 | 15,360         | 0,5483 |
| 1900        | 8,655           | 6,669           | 7,934             | 5,948             | 0,3089         | 0,2380          | 0,2832           | 0,2123            | 15070          | 538,1 | 15,767         | 0,5628 |
| 2000        | 8,686           | 6,700           | 7,971             | 5,985             | 0,3100         | 0,2391          | 0,2846           | 0,2136            | 15940          | 569,0 | 16,157         | 0,5767 |

\* Таблицы 8—20 термодинамических функций газов в идеальном состоянии замкнуты из [Л. 5].

Таблица 9

Кислород  $O_2$ 

| Температура | Теплоемкость                   |              |              |              |              |              | Энтальпия   |           | Энтропия                    |                           |
|-------------|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-----------|-----------------------------|---------------------------|
|             | $\mu_{с\ p}$                   | $\mu_{с\ p}$ | $\mu_{с\ p}$ | $\mu_{с\ p}$ | $\mu_{с\ p}$ | $\mu_{с\ p}$ | $\mu_i$     | $i$       | $\mu_s$                     | $s$                       |
| $^{\circ}C$ | $ккал/моль \cdot ^{\circ}град$ |              |              |              |              |              | $ккал/моль$ | $ккал/кг$ | $ккал/моль \cdot ^{\circ}K$ | $ккал/кг \cdot ^{\circ}K$ |
| 0           | 6,992                          | 5,006        | 6,992        | 5,006        | 0,2185       | 0,1554       | 0           | 0         | 0                           | 0                         |
| 100         | 7,136                          | 5,150        | 7,055        | 5,069        | 0,2230       | 0,1609       | 705,5       | 22,05     | 2,161                       | 0,0675                    |
| 200         | 7,360                          | 5,374        | 7,149        | 5,163        | 0,2300       | 0,1679       | 1430        | 44,68     | 3,884                       | 0,1214                    |
| 300         | 7,603                          | 5,617        | 7,261        | 5,275        | 0,2376       | 0,1755       | 2178        | 68,07     | 5,318                       | 0,1662                    |
| 400         | 7,824                          | 5,838        | 7,375        | 5,389        | 0,2445       | 0,1824       | 2950        | 92,20     | 6,560                       | 0,2050                    |
| 500         | 8,013                          | 6,027        | 7,484        | 5,498        | 0,2504       | 0,1833       | 3742        | 116,9     | 7,656                       | 0,2393                    |
| 600         | 8,169                          | 6,163        | 7,586        | 5,600        | 0,2553       | 0,1932       | 4552        | 142,3     | 8,640                       | 0,2700                    |
| 700         | 8,299                          | 6,313        | 7,679        | 5,693        | 0,2593       | 0,1973       | 5375        | 168,0     | 9,534                       | 0,2979                    |
| 800         | 8,408                          | 6,422        | 7,763        | 5,777        | 0,2627       | 0,2007       | 6210        | 194,1     | 10,350                      | 0,3234                    |
| 900         | 8,499                          | 6,513        | 7,840        | 5,854        | 0,2656       | 0,2035       | 7056        | 220,5     | 11,103                      | 0,3470                    |
| 1000        | 8,578                          | 6,592        | 7,910        | 5,924        | 0,2682       | 0,2060       | 7910        | 247,2     | 11,802                      | 0,3688                    |
| 1100        | 8,650                          | 6,664        | 7,974        | 5,988        | 0,2703       | 0,2082       | 8771        | 274,1     | 12,453                      | 0,3892                    |
| 1200        | 8,715                          | 6,729        | 8,033        | 6,047        | 0,2723       | 0,2103       | 9640        | 301,2     | 13,063                      | 0,4082                    |
| 1300        | 8,778                          | 6,792        | 8,088        | 6,102        | 0,2743       | 0,2122       | 10510       | 328,5     | 13,638                      | 0,4262                    |
| 1400        | 8,837                          | 6,851        | 8,139        | 6,153        | 0,2762       | 0,2141       | 11390       | 356,0     | 14,181                      | 0,4432                    |
| 1500        | 8,895                          | 6,909        | 8,188        | 6,202        | 0,2780       | 0,2159       | 12280       | 383,8     | 14,695                      | 0,4592                    |
| 1600        | 8,952                          | 6,966        | 8,234        | 6,248        | 0,2797       | 0,2177       | 13170       | 411,7     | 15,185                      | 0,4745                    |
| 1700        | 9,008                          | 7,022        | 8,278        | 6,292        | 0,2815       | 0,2194       | 14070       | 439,8     | 15,652                      | 0,4891                    |
| 1800        | 9,063                          | 7,077        | 8,320        | 6,334        | 0,2832       | 0,2212       | 14980       | 468,0     | 16,098                      | 0,5031                    |
| 1900        | 9,118                          | 7,132        | 8,361        | 6,375        | 0,2849       | 0,2229       | 15890       | 496,5     | 16,527                      | 0,5185                    |
| 2000        | 9,173                          | 7,187        | 8,400        | 6,414        | 0,2867       | 0,2246       | 16800       | 525,0     | 16,939                      | 0,5293                    |

Таблица 10  
Атмосферный азот N<sub>2</sub>, атм

| Темпе-<br>ратура | Теплоемкость |       |                                |       |        |        | Энтальпия |       | Энтропия   |        |
|------------------|--------------|-------|--------------------------------|-------|--------|--------|-----------|-------|------------|--------|
|                  | μср          | μсв   | $\mu_{\text{ср}}^{\text{жид}}$ | μсж   | ср     | св     | μ         | i     | μs         | s      |
| °C               | ккал/кг·град |       |                                |       |        |        | ккал/кг   |       | ккал/кг·°K |        |
| 0                | 6,931        | 4,945 | 6,931                          | 4,945 | 0,2461 | 0,1756 | 0         | 0     | 0          | 0      |
| 100              | 6,951        | 4,965 | 6,938                          | 4,952 | 0,2469 | 0,1763 | 693,8     | 24,64 | 2,164      | 0,0768 |
| 200              | 7,016        | 5,030 | 6,958                          | 4,968 | 0,2491 | 0,1786 | 1 392     | 49,42 | 3,821      | 0,1357 |
| 300              | 7,130        | 5,144 | 6,995                          | 5,009 | 0,2532 | 0,1827 | 2 099     | 74,52 | 5,176      | 0,1838 |
| 400              | 7,277        | 5,291 | 7,046                          | 5,060 | 0,2584 | 0,1879 | 2 818     | 100,1 | 6,333      | 0,2249 |
| 500              | 7,436        | 5,450 | 7,109                          | 5,123 | 0,2641 | 0,1935 | 3 555     | 126,2 | 7,352      | 0,2511 |
| 600              | 7,594        | 5,608 | 7,176                          | 5,190 | 0,2697 | 0,1992 | 4 306     | 152,9 | 8,266      | 0,2935 |
| 700              | 7,741        | 5,765 | 7,247                          | 5,251 | 0,2749 | 0,2044 | 5 073     | 180,2 | 9,097      | 0,3230 |
| 800              | 7,873        | 5,887 | 7,317                          | 5,331 | 0,2796 | 0,2091 | 5 854     | 207,9 | 9,861      | 0,3502 |
| 900              | 7,991        | 6,005 | 7,386                          | 5,400 | 0,2838 | 0,2132 | 6 647     | 236,1 | 10,568     | 0,3753 |
| 1 000            | 8,095        | 6,109 | 7,451                          | 5,465 | 0,2874 | 0,2169 | 7 451     | 264,6 | 11,226     | 0,3992 |
| 1 100            | 8,186        | 6,200 | 7,513                          | 5,527 | 0,2907 | 0,2202 | 8 254     | 293,5 | 11,841     | 0,4205 |
| 1 200            | 8,266        | 6,280 | 7,573                          | 5,587 | 0,2935 | 0,2230 | 9 088     | 322,7 | 12,419     | 0,4410 |
| 1 300            | 8,336        | 6,350 | 7,629                          | 5,643 | 0,2960 | 0,2255 | 9 918     | 352,2 | 12,968     | 0,4602 |
| 1 400            | 8,397        | 6,411 | 7,682                          | 5,696 | 0,2982 | 0,2277 | 10 750    | 381,9 | 13,480     | 0,4787 |
| 1 500            | 8,451        | 6,465 | 7,732                          | 5,746 | 0,3001 | 0,2296 | 11 598    | 411,9 | 13,969     | 0,4961 |
| 1 600            | 8,498        | 6,512 | 7,778                          | 5,792 | 0,3018 | 0,2313 | 12 440    | 441,9 | 14,434     | 0,5126 |
| 1 700            | 8,541        | 6,565 | 7,822                          | 5,836 | 0,3033 | 0,2328 | 13 300    | 472,3 | 14,877     | 0,5283 |
| 1 800            | 8,579        | 6,593 | 7,862                          | 5,876 | 0,3047 | 0,2341 | 14 150    | 502,6 | 15,300     | 0,5433 |
| 1 900            | 8,614        | 6,628 | 7,901                          | 5,915 | 0,3059 | 0,2354 | 15 010    | 533,1 | 15,705     | 0,5577 |
| 2 000            | 8,644        | 6,658 | 7,937                          | 5,951 | 0,3070 | 0,2364 | 15 870    | 563,8 | 16,093     | 0,5715 |

Таблица 11

## Воздух

| Температура        | Теплоемкость                             |         |            |            |         |         | Энтальпия                             |                  | Энтропия                              |                                       |
|--------------------|------------------------------------------|---------|------------|------------|---------|---------|---------------------------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                    | $\mu_p$                                  | $\mu_v$ | $\mu_{gm}$ | $\mu_{gm}$ | $\mu_p$ | $\mu_v$ | $\mu$                                 | $i$              | $\mu_s$                               | $s$                                   |
| $^{\circ}\text{C}$ | $\text{ккал/кг}\cdot^{\circ}\text{град}$ |         |            |            |         |         | $\text{ккал/кг}\cdot^{\circ}\text{C}$ | $\text{ккал/кг}$ | $\text{ккал/кг}\cdot^{\circ}\text{C}$ | $\text{ккал/кг}\cdot^{\circ}\text{C}$ |
| 0                  | 6,944                                    | 4,958   | 6,944      | 4,958      | 0,2397  | 0,1711  | 0                                     | 0                | 0                                     | 0                                     |
| 100                | 6,990                                    | 5,004   | 6,963      | 4,977      | 0,2413  | 0,1727  | 695,3                                 | 24,03            | 2,164                                 | 0,0746                                |
| 200                | 7,088                                    | 6,102   | 6,998      | 5,012      | 0,2447  | 0,1761  | 1400                                  | 48,32            | 3,834                                 | 0,1324                                |
| 300                | 7,299                                    | 5,243   | 7,051      | 5,065      | 0,2495  | 0,1810  | 2115                                  | 73,02            | 5,203                                 | 0,1797                                |
| 400                | 7,392                                    | 5,406   | 7,115      | 5,129      | 0,2552  | 0,1866  | 2846                                  | 98,24            | 6,381                                 | 0,2303                                |
| 500                | 7,557                                    | 5,571   | 7,188      | 5,202      | 0,2609  | 0,1923  | 3594                                  | 124,1            | 7,415                                 | 0,2860                                |
| 600                | 7,715                                    | 5,729   | 7,262      | 5,276      | 0,2663  | 0,1978  | 4357                                  | 150,4            | 8,345                                 | 0,3380                                |
| 700                | 7,868                                    | 5,872   | 7,338      | 5,352      | 0,2712  | 0,2027  | 5137                                  | 177,3            | 9,189                                 | 0,3172                                |
| 800                | 7,955                                    | 5,999   | 7,411      | 5,425      | 0,2756  | 0,2071  | 5929                                  | 204,6            | 9,964                                 | 0,3439                                |
| 900                | 8,098                                    | 6,112   | 7,481      | 5,495      | 0,2795  | 0,2110  | 6733                                  | 232,5            | 10,680                                | 0,3687                                |
| 1000               | 8,196                                    | 6,210   | 7,547      | 5,561      | 0,2829  | 0,2144  | 7547                                  | 260,5            | 11,347                                | 0,3917                                |
| 1100               | 8,283                                    | 6,297   | 7,610      | 5,624      | 0,2859  | 0,2174  | 8371                                  | 289,0            | 11,970                                | 0,4132                                |
| 1200               | 8,360                                    | 6,374   | 7,669      | 5,683      | 0,2886  | 0,2200  | 9203                                  | 317,6            | 12,555                                | 0,4334                                |
| 1300               | 8,429                                    | 6,443   | 7,725      | 5,739      | 0,2909  | 0,2224  | 10040                                 | 346,7            | 13,101                                | 0,4522                                |
| 1400               | 8,490                                    | 6,504   | 7,778      | 5,792      | 0,2930  | 0,2245  | 10890                                 | 375,9            | 13,628                                | 0,4704                                |
| 1500               | 8,544                                    | 6,558   | 7,828      | 5,842      | 0,2949  | 0,2264  | 11740                                 | 405,3            | 14,122                                | 0,4875                                |
| 1600               | 8,593                                    | 6,607   | 7,874      | 5,888      | 0,2966  | 0,2281  | 12600                                 | 434,9            | 14,592                                | 0,5037                                |
| 1700               | 8,639                                    | 6,653   | 7,918      | 5,932      | 0,2982  | 0,2296  | 13460                                 | 464,6            | 15,040                                | 0,5224                                |
| 1800               | 8,681                                    | 6,695   | 7,958      | 5,972      | 0,2996  | 0,2311  | 14320                                 | 494,5            | 15,468                                | 0,5339                                |
| 1900               | 8,720                                    | 6,734   | 7,997      | 6,011      | 0,3010  | 0,2324  | 15190                                 | 524,6            | 15,878                                | 0,5481                                |
| 2000               | 8,755                                    | 6,769   | 8,035      | 6,049      | 0,3022  | 0,2337  | 16070                                 | 554,6            | 16,271                                | 0,5617                                |

Водород Н<sub>2</sub>

| Темпе-<br>ратура | Теплоемкость    |            |             |             |        |        | Энтальпия       |          | Энтропия      |            |
|------------------|-----------------|------------|-------------|-------------|--------|--------|-----------------|----------|---------------|------------|
|                  | $\mu_{ср}$      | $\mu_{св}$ | $\mu_{срм}$ | $\mu_{свм}$ | $c_p$  | $c_v$  | $c_{pm}$        | $c_{vm}$ | $\mu$         | $i$        |
|                  | ккал/кмоль-град |            |             |             |        |        | ккал/кмоль-град |          | ккал/кмоль    | ккал/кг    |
| °C               |                 |            |             |             |        |        |                 |          | ккал/кмоль-°K | ккал/кг-°K |
| 0                | 6,836           | 4,849      | 6,835       | 4,849       | 3,3904 | 2,4053 | 3,3904          | 2,4053   | 0             | 0          |
| 100              | 6,957           | 4,971      | 6,911       | 4,925       | 3,4509 | 2,4568 | 3,4281          | 2,4430   | 2,112         | 1,048      |
| 200              | 6,984           | 4,998      | 6,944       | 4,958       | 3,4643 | 2,4792 | 3,4444          | 2,4593   | 3,775         | 1,872      |
| 300              | 6,998           | 5,012      | 6,956       | 4,970       | 3,4712 | 2,4861 | 3,4504          | 2,4653   | 5,114         | 2,537      |
| 400              | 7,021           | 5,035      | 6,971       | 4,985       | 3,4826 | 2,4975 | 3,4578          | 2,4727   | 6,242         | 3,096      |
| 500              | 7,060           | 5,074      | 6,985       | 5,000       | 3,5020 | 2,5169 | 3,4653          | 2,4802   | 7,216         | 3,579      |
| 600              | 7,116           | 5,130      | 7,002       | 5,016       | 3,5298 | 2,5446 | 3,4732          | 2,4881   | 8,078         | 4,007      |
| 700              | 7,189           | 5,203      | 7,024       | 5,038       | 3,5660 | 2,5808 | 3,4841          | 2,4990   | 8,855         | 4,392      |
| 800              | 7,278           | 5,292      | 7,050       | 5,064       | 3,6101 | 2,6250 | 3,4970          | 2,5119   | 9,562         | 4,743      |
| 900              | 7,373           | 5,387      | 7,081       | 5,095       | 3,5572 | 2,6721 | 3,5124          | 2,5273   | 10,214        | 5,066      |
| 1000             | 7,472           | 5,486      | 7,115       | 5,129       | 3,7063 | 2,7212 | 3,5293          | 2,5441   | 10,822        | 5,368      |
| 1100             | 7,577           | 5,591      | 7,162       | 5,165       | 3,7584 | 2,7733 | 3,5476          | 2,5625   | 11,389        | 5,649      |
| 1200             | 7,680           | 5,694      | 7,191       | 5,205       | 3,8095 | 2,8244 | 3,5670          | 2,5818   | 11,925        | 5,915      |
| 1300             | 7,784           | 5,798      | 7,234       | 5,248       | 3,8611 | 2,8760 | 3,5883          | 2,6032   | 12,434        | 6,168      |
| 1400             | 7,882           | 5,896      | 7,277       | 5,291       | 3,9097 | 2,9246 | 3,6096          | 2,6245   | 12,917        | 6,407      |
| 1500             | 7,976           | 5,990      | 7,320       | 5,334       | 3,9563 | 2,9712 | 3,6309          | 2,6458   | 13,377        | 6,635      |
| 1600             | 8,064           | 6,078      | 7,364       | 5,378       | 4,0000 | 3,0149 | 3,6528          | 2,6677   | 13,817        | 6,854      |
| 1700             | 8,148           | 6,162      | 7,407       | 5,421       | 4,0417 | 3,0565 | 3,6741          | 2,6890   | 14,239        | 7,063      |
| 1800             | 8,227           | 6,241      | 7,450       | 5,464       | 4,0808 | 3,0957 | 3,6954          | 2,7103   | 14,646        | 7,263      |
| 1900             | 8,303           | 6,317      | 7,493       | 5,507       | 4,1185 | 3,1334 | 3,7168          | 2,7316   | 15,032        | 7,456      |
| 2000             | 8,373           | 6,387      | 7,535       | 5,549       | 4,1533 | 3,1681 | 3,7376          | 2,7525   | 15,407        | 7,642      |

## Оксид азота NO

| Температура | Теплоемкость          |         |                   |                   |                   |                       |        |                  |                  |                  | Энтальпия             |                  | Энтрония              |                       |
|-------------|-----------------------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|--------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|
|             | $\text{ккал/кг-град}$ |         |                   |                   |                   | $\text{ккал/кг-град}$ |        |                  |                  |                  | $\mu_i$               | $i$              | $\mu_s$               | $s$                   |
|             | $\mu_p$               | $\mu_g$ | $\mu_{\text{см}}$ | $\mu_{\text{см}}$ | $\mu_{\text{см}}$ | $c_p$                 | $c_v$  | $c_{\text{р-т}}$ | $c_{\text{в-т}}$ | $c_{\text{в-т}}$ | $\text{ккал/кг-град}$ | $\text{ккал/кг}$ | $\text{ккал/кг-град}$ | $\text{ккал/кг-град}$ |
| 0           | 7,160                 | 5,174   | 7,160             | 5,174             | 0,2386            | 0,2386                | 0,1794 | 0,2386           | 0,1724           | 0                | 0                     | 0                | 0                     | 0                     |
| 100         | 7,146                 | 5,160   | 7,143             | 5,157             | 0,2381            | 0,2381                | 0,1719 | 0,2380           | 0,1718           | 714,3            | 23,80                 | 2,229            | 0,0742                | 0,1311                |
| 200         | 7,245                 | 5,259   | 7,165             | 5,179             | 0,2414            | 0,2414                | 0,1752 | 0,2388           | 0,1725           | 1433             | 47,76                 | 3,936            | 0,1311                | 0,1780                |
| 300         | 7,418                 | 5,432   | 7,220             | 5,234             | 0,2472            | 0,2472                | 0,1810 | 0,2406           | 0,1744           | 2166             | 72,18                 | 5,343            | 0,1780                | 0,2182                |
| 400         | 7,603                 | 5,617   | 7,292             | 5,306             | 0,2534            | 0,2534                | 0,1872 | 0,2430           | 0,1768           | 2917             | 97,20                 | 6,549            | 0,2182                | 0,2537                |
| 500         | 7,784                 | 5,798   | 7,373             | 5,387             | 0,2594            | 0,2594                | 0,1932 | 0,2457           | 0,1795           | 3686             | 122,8                 | 7,614            | 0,2537                | 0,2856                |
| 600         | 7,946                 | 5,950   | 7,455             | 5,469             | 0,2648            | 0,2648                | 0,1986 | 0,2484           | 0,1822           | 4473             | 149,0                 | 8,571            | 0,2856                | 0,3146                |
| 700         | 8,087                 | 6,101   | 7,536             | 5,550             | 0,2695            | 0,2695                | 0,2033 | 0,2511           | 0,1849           | 5275             | 175,8                 | 9,443            | 0,3146                | 0,3413                |
| 800         | 8,209                 | 6,223   | 7,613             | 5,627             | 0,2736            | 0,2736                | 0,2074 | 0,2537           | 0,1875           | 6090             | 203,0                 | 10,243           | 0,3413                | 0,3658                |
| 900         | 8,311                 | 6,325   | 7,684             | 5,698             | 0,2770            | 0,2770                | 0,2108 | 0,2561           | 0,1899           | 6916             | 230,5                 | 10,979           | 0,3658                | 0,3885                |
| 1000        | 8,399                 | 6,413   | 7,752             | 5,766             | 0,2799            | 0,2799                | 0,2137 | 0,2583           | 0,1921           | 7752             | 258,3                 | 11,662           | 0,3885                | 0,4098                |
| 1100        | 8,473                 | 6,497   | 7,814             | 5,828             | 0,2824            | 0,2824                | 0,2165 | 0,2504           | 0,1942           | 8595             | 286,4                 | 12,298           | 0,4098                | 0,4298                |
| 1200        | 8,537                 | 6,557   | 7,872             | 5,886             | 0,2845            | 0,2845                | 0,2183 | 0,2623           | 0,1951           | 9446             | 314,8                 | 12,897           | 0,4298                | 0,4486                |
| 1300        | 8,594                 | 6,608   | 7,925             | 5,939             | 0,2864            | 0,2864                | 0,2202 | 0,2641           | 0,1979           | 10300            | 343,3                 | 13,460           | 0,4486                | 0,4663                |
| 1400        | 8,644                 | 6,658   | 7,975             | 5,989             | 0,2881            | 0,2881                | 0,2219 | 0,2658           | 0,1996           | 11160            | 372,1                 | 13,991           | 0,4663                | 0,4831                |
| 1500        | 8,687                 | 6,701   | 8,021             | 6,035             | 0,2895            | 0,2895                | 0,2233 | 0,2673           | 0,2011           | 12030            | 401,0                 | 14,495           | 0,4831                | 0,4990                |
| 1600        | 8,724                 | 6,738   | 8,065             | 6,079             | 0,2907            | 0,2907                | 0,2245 | 0,2688           | 0,2026           | 12900            | 430,1                 | 14,973           | 0,4990                | 0,5141                |
| 1700        | 8,757                 | 6,771   | 8,105             | 6,119             | 0,2918            | 0,2918                | 0,2256 | 0,2701           | 0,2039           | 13780            | 459,2                 | 15,427           | 0,5141                | 0,5285                |
| 1800        | 8,788                 | 6,802   | 8,142             | 6,156             | 0,2928            | 0,2928                | 0,2267 | 0,2713           | 0,2051           | 14660            | 488,3                 | 15,890           | 0,5285                | 0,5423                |
| 1900        | 8,816                 | 6,830   | 8,176             | 6,190             | 0,2938            | 0,2938                | 0,2276 | 0,2725           | 0,2063           | 15530            | 517,8                 | 16,273           | 0,5423                | 0,5555                |
| 2000        | 8,843                 | 6,857   | 8,209             | 6,223             | 0,2947            | 0,2947                | 0,2285 | 0,2736           | 0,2074           | 16420            | 547,2                 | 16,669           | 0,5555                |                       |

## Оксид углерода СО

| Темпе-<br>ратура<br><i>t</i> | Теплоемкость      |                   |                    |                    |                   |                   | Энтальпия  |            | Энтродия         |        |
|------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|------------|------------|------------------|--------|
|                              | $\mu_{\text{ср}}$ | $\mu_{\text{св}}$ | $\mu_{\text{срм}}$ | $\mu_{\text{срм}}$ | $\mu_{\text{ср}}$ | $\mu_{\text{св}}$ | $\mu$      | $i$        | $\mu_{\text{с}}$ | $s$    |
|                              |                   |                   |                    |                    |                   |                   |            |            |                  |        |
| °С                           | ккал/кмоль-град   |                   |                    |                    |                   |                   | ккал/кмоль | ккал/кг-°С | ккал/кг-°К       |        |
| 0                            | 6,956             | 4,970             | 6,956              | 4,970              | 0,2483            | 0,1774            | 0,2483     | 0,1774     | 0                | 0      |
| 100                          | 6,989             | 5,003             | 6,989              | 4,983              | 0,2495            | 0,1786            | 0,2488     | 0,1779     | 2,174            | 0,0776 |
| 200                          | 7,081             | 5,095             | 6,999              | 5,013              | 0,2528            | 0,1819            | 0,2499     | 0,1790     | 3,842            | 0,1372 |
| 300                          | 7,226             | 5,240             | 7,050              | 5,064              | 0,2580            | 0,1871            | 0,2517     | 0,1808     | 5,213            | 0,1861 |
| 400                          | 7,398             | 5,412             | 7,115              | 5,129              | 0,2641            | 0,1932            | 0,2540     | 0,1831     | 6,388            | 0,2281 |
| 500                          | 7,573             | 5,587             | 7,189              | 5,203              | 0,2704            | 0,1995            | 0,2567     | 0,1857     | 7,425            | 0,2651 |
| 600                          | 7,739             | 5,753             | 7,267              | 5,281              | 0,2763            | 0,2054            | 0,2594     | 0,1885     | 8,356            | 0,2983 |
| 700                          | 7,888             | 5,902             | 7,345              | 5,359              | 0,2816            | 0,2107            | 0,2622     | 0,1913     | 9,203            | 0,3286 |
| 800                          | 8,019             | 6,033             | 7,421              | 5,435              | 0,2863            | 0,2154            | 0,2649     | 0,1940     | 9,981            | 0,3563 |
| 900                          | 8,134             | 6,148             | 7,494              | 5,508              | 0,2904            | 0,2195            | 0,2675     | 0,1966     | 10,701           | 0,3820 |
| 1000                         | 8,233             | 6,247             | 7,563              | 5,577              | 0,2939            | 0,2230            | 0,2700     | 0,1991     | 11,370           | 0,4059 |
| 1100                         | 8,318             | 6,332             | 7,628              | 5,642              | 0,2970            | 0,2261            | 0,2723     | 0,2014     | 11,996           | 0,4283 |
| 1200                         | 8,393             | 6,407             | 7,689              | 5,703              | 0,2996            | 0,2287            | 0,2745     | 0,2046     | 12,583           | 0,4492 |
| 1300                         | 8,458             | 6,472             | 7,745              | 5,759              | 0,3020            | 0,2311            | 0,2765     | 0,2056     | 13,137           | 0,4690 |
| 1400                         | 8,514             | 6,528             | 7,799              | 5,813              | 0,3040            | 0,2330            | 0,2784     | 0,2075     | 13,660           | 0,4877 |
| 1500                         | 8,564             | 6,578             | 7,848              | 5,862              | 0,3057            | 0,2348            | 0,2802     | 0,2093     | 14,155           | 0,5054 |
| 1600                         | 8,608             | 6,622             | 7,894              | 5,908              | 0,3073            | 0,2364            | 0,2818     | 0,2109     | 14,626           | 0,5222 |
| 1700                         | 8,647             | 6,661             | 7,937              | 5,951              | 0,3087            | 0,2378            | 0,2834     | 0,2124     | 15,075           | 0,5382 |
| 1800                         | 8,682             | 6,696             | 7,978              | 5,992              | 0,3100            | 0,2390            | 0,2848     | 0,2139     | 15,503           | 0,5535 |
| 1900                         | 8,713             | 6,727             | 8,016              | 6,030              | 0,3111            | 0,2402            | 0,2862     | 0,2153     | 15,913           | 0,5681 |
| 2000                         | 8,741             | 6,755             | 8,051              | 6,065              | 0,3121            | 0,2412            | 0,2874     | 0,2165     | 16,306           | 0,5821 |

Таблица 15

Сернистый ангидрид  $\text{SO}_2$ 

| Темпе-<br>ратура | Теплоемкость                                        |            |             |             |       |       | Энтальпия                                           |          | Энтропия                            |                                     |
|------------------|-----------------------------------------------------|------------|-------------|-------------|-------|-------|-----------------------------------------------------|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                  | $\mu_{ср}$                                          | $\mu_{св}$ | $\mu_{срж}$ | $\mu_{свт}$ | $c_p$ | $c_v$ | $c_{рж}$                                            | $c_{вт}$ | $\mu$                               | $i$                                 |
|                  | $\text{ккал/кг}\cdot^\circ\text{С}\cdot\text{град}$ |            |             |             |       |       | $\text{ккал/кг}\cdot^\circ\text{С}\cdot\text{град}$ |          | $\text{ккал/кг}\cdot^\circ\text{С}$ | $s$                                 |
| $^\circ\text{С}$ | $\text{ккал/кг}\cdot^\circ\text{С}\cdot\text{град}$ |            |             |             |       |       | $\text{ккал/кг}\cdot^\circ\text{С}\cdot\text{град}$ |          | $\text{ккал/кг}\cdot^\circ\text{С}$ | $\text{ккал/кг}\cdot^\circ\text{С}$ |
| 0                | 9,28                                                | 7,29       | 9,28        | 7,20        | 0,145 | 0,114 | 0,145                                               | 0,114    | 0                                   | 0                                   |
| 100              | 10,13                                               | 8,14       | 9,71        | 7,72        | 0,158 | 0,127 | 0,152                                               | 0,121    | 971                                 | 15,16                               |
| 200              | 10,88                                               | 8,89       | 10,11       | 8,12        | 0,170 | 0,139 | 0,158                                               | 0,127    | 2022                                | 31,56                               |
| 300              | 11,52                                               | 9,53       | 10,48       | 8,49        | 0,180 | 0,149 | 0,164                                               | 0,133    | 3144                                | 49,07                               |
| 400              | 12,00                                               | 10,01      | 10,80       | 8,81        | 0,187 | 0,156 | 0,169                                               | 0,138    | 4320                                | 67,43                               |
| 500              | 12,35                                               | 10,36      | 11,08       | 9,09        | 0,193 | 0,162 | 0,173                                               | 0,142    | 5540                                | 86,47                               |
| 600              | 12,63                                               | 10,64      | 11,31       | 9,32        | 0,197 | 0,166 | 0,176                                               | 0,145    | 6786                                | 105,9                               |
| 700              | 12,84                                               | 10,85      | 11,52       | 9,53        | 0,200 | 0,169 | 0,180                                               | 0,149    | 8064                                | 125,9                               |
| 800              | 13,00                                               | 11,01      | 11,69       | 9,70        | 0,203 | 0,172 | 0,182                                               | 0,151    | 9352                                | 146,0                               |
| 900              | 13,14                                               | 11,15      | 11,85       | 9,86        | 0,205 | 0,174 | 0,185                                               | 0,154    | 10665                               | 166,5                               |
| 1000             | 13,24                                               | 11,25      | 11,98       | 9,99        | 0,207 | 0,176 | 0,187                                               | 0,156    | 11980                               | 187,0                               |
| 1100             | 13,32                                               | 11,33      | 12,10       | 10,11       | 0,208 | 0,177 | 0,189                                               | 0,158    | 13310                               | 207,8                               |
| 1200             | 13,39                                               | 11,40      | 12,20       | 10,21       | 0,209 | 0,178 | 0,190                                               | 0,159    | 14640                               | 228,5                               |



Сероводород  $H_2S$ 

| Темпе-<br>ратура | Теплоемкость |       |              |      |       |       |       |              |        |       | Энтальпия |       | Энтропия |       |       |       |
|------------------|--------------|-------|--------------|------|-------|-------|-------|--------------|--------|-------|-----------|-------|----------|-------|-------|-------|
|                  | t            | °C    | ккал/кг·град |      |       |       |       | ккал/кг·град |        |       |           |       | μ        | i     | μs    | s     |
|                  |              |       | μcp          | μcp  | μcp   | μcp   | μcp   | cp           | cv     | cpm   | cvm       |       |          |       |       |       |
| 0                | 8,07         | 6,08  | 8,07         | 6,08 | 0,237 | 0,178 | 0,237 | 0,178        | 0      | 0     | 0         | 0     | 0        | 0     | 0     | 0     |
| 100              | 8,34         | 6,35  | 8,20         | 6,21 | 0,245 | 0,186 | 0,241 | 0,182        | 820    | 24,1  | 2,51      | 0,074 | 0,074    | 0,074 | 0,074 | 0,074 |
| 200              | 8,70         | 6,71  | 8,36         | 6,37 | 0,255 | 0,197 | 0,245 | 0,187        | 1 672  | 49,0  | 4,53      | 0,133 | 0,133    | 0,133 | 0,133 | 0,133 |
| 300              | 9,12         | 7,13  | 8,54         | 6,55 | 0,268 | 0,209 | 0,251 | 0,192        | 2 562  | 75,3  | 6,23      | 0,183 | 0,183    | 0,183 | 0,183 | 0,183 |
| 400              | 9,55         | 7,56  | 8,74         | 6,75 | 0,280 | 0,222 | 0,258 | 0,198        | 3 496  | 103,2 | 7,73      | 0,227 | 0,227    | 0,227 | 0,227 | 0,227 |
| 500              | 9,97         | 7,98  | 8,94         | 6,95 | 0,293 | 0,234 | 0,262 | 0,204        | 4 470  | 131,0 | 9,09      | 0,267 | 0,267    | 0,267 | 0,267 | 0,267 |
| 600              | 10,37        | 8,38  | 9,15         | 7,16 | 0,304 | 0,246 | 0,268 | 0,210        | 5 490  | 160,8 | 10,33     | 0,303 | 0,303    | 0,303 | 0,303 | 0,303 |
| 700              | 10,75        | 8,76  | 9,35         | 7,36 | 0,315 | 0,257 | 0,274 | 0,216        | 6 545  | 191,8 | 11,47     | 0,336 | 0,336    | 0,336 | 0,336 | 0,336 |
| 800              | 11,08        | 9,09  | 9,55         | 7,56 | 0,325 | 0,267 | 0,280 | 0,222        | 7 640  | 224,0 | 12,54     | 0,368 | 0,368    | 0,368 | 0,368 | 0,368 |
| 900              | 11,38        | 9,39  | 9,73         | 7,74 | 0,334 | 0,276 | 0,285 | 0,227        | 8 757  | 256,5 | 13,54     | 0,397 | 0,397    | 0,397 | 0,397 | 0,397 |
| 1 000            | 11,65        | 9,66  | 9,91         | 7,92 | 0,342 | 0,283 | 0,291 | 0,232        | 9 910  | 291,0 | 14,48     | 0,425 | 0,425    | 0,425 | 0,425 | 0,425 |
| 1 100            | 11,88        | 9,89  | 10,08        | 8,09 | 0,349 | 0,290 | 0,296 | 0,237        | 11 088 | 325,6 | 15,37     | 0,451 | 0,451    | 0,451 | 0,451 | 0,451 |
| 1 200            | 12,08        | 10,09 | 10,23        | 8,24 | 0,354 | 0,296 | 0,300 | 0,242        | 12 276 | 360,0 | 16,21     | 0,475 | 0,475    | 0,475 | 0,475 | 0,475 |

Водяной пар H<sub>2</sub>O

| Температура<br>t | Теплоемкость    |                 |                  |                  |                |                | Энтальпия        |                 | Энтродпия        |                 |
|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
|                  | и <sub>ср</sub> | и <sub>св</sub> | и <sub>срм</sub> | и <sub>срм</sub> | с <sub>р</sub> | с <sub>в</sub> | и <sub>срм</sub> | и <sub>св</sub> | и <sub>срм</sub> | и <sub>св</sub> |
| °C               | ккал/кг·град    |                 |                  |                  |                |                | ккал/кг          |                 | ккал/кг·°C       |                 |
| 0                | 8,001           | 6,015           | 8,001            | 6,015            | 0,4441         | 0,3339         | 0                | 0               | 0                | 0               |
| 100              | 8,134           | 6,148           | 8,059            | 6,073            | 0,4515         | 0,3413         | 805,9            | 2,481           | 0,1377           | 0,1377          |
| 200              | 8,351           | 6,365           | 8,149            | 6,163            | 0,4635         | 0,3533         | 1630             | 4,446           | 0,2468           | 0,2468          |
| 300              | 8,607           | 6,621           | 8,268            | 6,272            | 0,4778         | 0,3673         | 2477             | 6,066           | 0,3367           | 0,3367          |
| 400              | 8,893           | 6,897           | 8,381            | 6,395            | 0,4931         | 0,3828         | 3352             | 7,471           | 0,415            | 0,415           |
| 500              | 9,173           | 7,187           | 8,510            | 6,524            | 0,5092         | 0,3989         | 4265             | 8,720           | 0,484            | 0,484           |
| 600              | 9,473           | 7,437           | 8,645            | 6,659            | 0,5268         | 0,4166         | 5187             | 9,854           | 0,547            | 0,547           |
| 700              | 9,781           | 7,795           | 8,787            | 6,801            | 0,5429         | 0,4327         | 6151             | 10,899          | 0,605            | 0,605           |
| 800              | 10,091          | 8,105           | 8,931            | 6,945            | 0,5601         | 0,4499         | 7145             | 11,870          | 0,659            | 0,659           |
| 900              | 10,393          | 8,407           | 9,078            | 7,092            | 0,5769         | 0,4666         | 8170             | 12,781          | 0,709            | 0,709           |
| 1000             | 10,682          | 8,696           | 9,224            | 7,238            | 0,5929         | 0,4827         | 9224             | 13,642          | 0,757            | 0,757           |
| 1100             | 10,953          | 8,967           | 9,369            | 7,383            | 0,6080         | 0,4977         | 10310            | 14,459          | 0,803            | 0,803           |
| 1200             | 11,205          | 9,219           | 9,512            | 7,526            | 0,6220         | 0,5113         | 11410            | 15,237          | 0,846            | 0,846           |
| 1300             | 11,440          | 9,454           | 9,651            | 7,665            | 0,6350         | 0,5248         | 12550            | 15,98           | 0,887            | 0,887           |
| 1400             | 11,656          | 9,670           | 9,787            | 7,801            | 0,6470         | 0,5368         | 13700            | 16,69           | 0,926            | 0,926           |
| 1500             | 11,856          | 9,870           | 9,918            | 7,932            | 0,6581         | 0,5479         | 14890            | 17,37           | 0,964            | 0,964           |
| 1600             | 12,040          | 10,054          | 10,045           | 8,059            | 0,6683         | 0,5581         | 16070            | 18,03           | 1,001            | 1,001           |
| 1700             | 12,213          | 10,227          | 10,169           | 8,183            | 0,6779         | 0,5677         | 17290            | 18,66           | 1,036            | 1,036           |
| 1800             | 12,368          | 10,382          | 10,287           | 8,301            | 0,6865         | 0,5763         | 18520            | 19,27           | 1,069            | 1,069           |
| 1900             | 12,510          | 10,524          | 10,399           | 8,413            | 0,6944         | 0,5842         | 19760            | 19,86           | 1,102            | 1,102           |
| 2000             | 12,642          | 10,656          | 10,508           | 8,522            | 0,7017         | 0,5915         | 21020            | 20,43           | 1,134            | 1,134           |

Двуокись углерода  $\text{CO}_2$ 

| Температура<br>$t$<br>°C | Теплоемкость      |                   |                     |                     |        |        | Энтальпия |           | Энтродия |       |                   |        |
|--------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|--------|--------|-----------|-----------|----------|-------|-------------------|--------|
|                          | $\mu_{\text{ср}}$ | $\mu_{\text{ср}}$ | $\mu_{\text{ср,м}}$ | $\mu_{\text{ср,м}}$ | $c_p$  | $c_v$  | $c_{p,m}$ | $c_{v,m}$ | $\mu$    | $i$   | $\mu_{\text{ср}}$ | $s$    |
|                          |                   |                   |                     |                     |        |        |           |           |          |       |                   |        |
|                          |                   |                   |                     |                     |        |        |           |           |          |       |                   |        |
| ккал/кмоль·град          |                   |                   |                     |                     |        |        |           |           |          |       |                   |        |
| ккал/кг·град             |                   |                   |                     |                     |        |        |           |           |          |       |                   |        |
| ккал/кг·град             |                   |                   |                     |                     |        |        |           |           |          |       |                   |        |
| 0                        | 8,565             | 6,579             | 8,565               | 6,579               | 0,1946 | 0,1495 | 0,1946    | 0,1495    | 0        | 0     | 0                 | 0      |
| 100                      | 9,603             | 7,617             | 9,103               | 7,117               | 0,2182 | 0,1731 | 0,2068    | 0,1617    | 910,3    | 20,68 | 2,831             | 0,0643 |
| 200                      | 10,435            | 8,449             | 9,568               | 7,582               | 0,2371 | 0,1920 | 0,2174    | 0,1723    | 1914     | 43,48 | 5,210             | 0,1184 |
| 300                      | 11,110            | 9,124             | 9,973               | 7,987               | 0,2524 | 0,2073 | 0,2266    | 0,1815    | 2992     | 67,98 | 7,275             | 0,1653 |
| 400                      | 11,670            | 9,684             | 10,330              | 8,344               | 0,2652 | 0,2200 | 0,2347    | 0,1896    | 4132     | 93,88 | 9,107             | 0,2069 |
| 500                      | 12,137            | 10,151            | 10,646              | 8,660               | 0,2758 | 0,2307 | 0,2419    | 0,1968    | 5323     | 121,0 | 10,756            | 0,2444 |
| 600                      | 12,528            | 10,542            | 10,928              | 8,942               | 0,2847 | 0,2395 | 0,2483    | 0,2032    | 6557     | 149,0 | 12,256            | 0,2785 |
| 700                      | 12,856            | 10,870            | 11,181              | 9,195               | 0,2921 | 0,2470 | 0,2541    | 0,2089    | 7827     | 177,9 | 13,632            | 0,3098 |
| 800                      | 13,131            | 11,145            | 11,408              | 9,422               | 0,2984 | 0,2532 | 0,2592    | 0,2141    | 9126     | 207,4 | 14,903            | 0,3386 |
| 900                      | 13,364            | 11,378            | 11,612              | 9,626               | 0,3037 | 0,2585 | 0,2638    | 0,2187    | 10450    | 237,4 | 16,084            | 0,3655 |
| 1000                     | 13,560            | 11,574            | 11,797              | 9,811               | 0,3081 | 0,2630 | 0,2681    | 0,2229    | 11800    | 268,1 | 17,185            | 0,3905 |
| 1100                     | 13,727            | 11,741            | 11,966              | 9,980               | 0,3119 | 0,2668 | 0,2719    | 0,2268    | 13160    | 299,1 | 18,217            | 0,4139 |
| 1200                     | 13,870            | 11,884            | 12,119              | 10,133              | 0,3152 | 0,2700 | 0,2754    | 0,2302    | 14540    | 330,5 | 19,187            | 0,4360 |
| 1300                     | 13,993            | 12,007            | 12,258              | 10,272              | 0,3180 | 0,2728 | 0,2785    | 0,2334    | 15940    | 362,1 | 20,102            | 0,4558 |
| 1400                     | 14,099            | 12,113            | 12,366              | 10,400              | 0,3204 | 0,2752 | 0,2814    | 0,2363    | 17340    | 394,0 | 20,968            | 0,4764 |
| 1500                     | 14,190            | 12,204            | 12,503              | 10,517              | 0,3224 | 0,2773 | 0,2841    | 0,2390    | 18750    | 426,2 | 21,789            | 0,4951 |
| 1600                     | 14,268            | 12,282            | 12,611              | 10,625              | 0,3242 | 0,2791 | 0,2865    | 0,2414    | 20180    | 458,4 | 22,569            | 0,5128 |
| 1700                     | 14,336            | 12,350            | 12,711              | 10,725              | 0,3257 | 0,2806 | 0,2888    | 0,2437    | 21610    | 491,0 | 23,313            | 0,5297 |
| 1800                     | 14,395            | 12,409            | 12,803              | 10,817              | 0,3271 | 0,2820 | 0,2909    | 0,2458    | 23050    | 523,6 | 24,026            | 0,5459 |
| 1900                     | 14,445            | 12,459            | 12,888              | 10,902              | 0,3282 | 0,2831 | 0,2928    | 0,2477    | 24490    | 556,3 | 24,703            | 0,5613 |
| 2000                     | 14,487            | 12,501            | 12,967              | 10,981              | 0,3292 | 0,2840 | 0,2946    | 0,2495    | 25930    | 589,2 | 25,354            | 0,5761 |

Метан  $\text{CH}_4$ 

| Температура | Теплоемкость    |                 |                  |                  |                |                 |                  |                  |                 |                 | Энтальпия |         | Энтропия       |                |
|-------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------|---------|----------------|----------------|
|             | ккал/моль-град  |                 |                  |                  |                | ккал/кг-град    |                  |                  |                 |                 | H         | i       | H <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> |
|             | μ <sub>ср</sub> | μ <sub>св</sub> | μ <sub>срм</sub> | μ <sub>свм</sub> | с <sub>р</sub> | с <sub>св</sub> | с <sub>срм</sub> | с <sub>свм</sub> | с <sub>ср</sub> | с <sub>св</sub> |           |         |                |                |
| t           | ккал/моль-град  |                 |                  |                  |                |                 |                  |                  |                 |                 | ккал/моль | ккал/кг | ккал/моль-°K   | ккал/кг-°K     |
| °C          |                 |                 |                  |                  |                |                 |                  |                  |                 |                 |           |         |                |                |
| 0           | 8,297           | 6,311           | 8,297            | 6,311            | 0,5172         | 0,3934          | 0,5172           | 0,3934           | 0,5172          | 0,3934          | 0         | 0       | 0              | 0              |
| 100         | 9,382           | 7,396           | 8,791            | 6,805            | 0,5848         | 0,4610          | 0,5480           | 0,4242           | 0,5848          | 0,4610          | 879,1     | 54,80   | 2,70           | 0,158          |
| 200         | 10,755          | 8,769           | 9,417            | 7,431            | 0,6704         | 0,5466          | 0,5870           | 0,4632           | 0,6704          | 0,5466          | 1 883     | 117,4   | 5,08           | 0,317          |
| 300         | 12,167          | 10,181          | 10,097           | 8,111            | 0,7584         | 0,6346          | 0,6294           | 0,5056           | 0,7584          | 0,6346          | 3 029     | 188,8   | 7,28           | 0,454          |
| 400         | 13,524          | 11,538          | 10,791           | 8,805            | 0,8430         | 0,7192          | 0,6727           | 0,5489           | 0,8430          | 0,7192          | 4 316     | 269,1   | 9,35           | 0,583          |
| 500         | 14,774          | 12,788          | 11,459           | 9,473            | 0,9210         | 0,7972          | 0,7143           | 0,5905           | 0,9210          | 0,7972          | 5 729     | 357,1   | 11,30          | 0,704          |
| 600         | 15,912          | 13,926          | 12,103           | 10,117           | 0,9919         | 0,8681          | 0,7545           | 0,6307           | 0,9919          | 0,8681          | 7 262     | 452,7   | 13,17          | 0,821          |
| 700         | 16,941          | 14,955          | 12,725           | 10,739           | 1,0560         | 0,9322          | 0,7932           | 0,6694           | 1,0560          | 0,9322          | 8 907     | 555,2   | 14,95          | 0,932          |
| 800         | 17,853          | 15,867          | 13,352           | 11,366           | 1,1129         | 0,9891          | 0,8323           | 0,7085           | 1,1129          | 0,9891          | 10 580    | 665,8   | 16,62          | 1,035          |
| 900         | 18,670          | 16,684          | 13,932           | 11,945           | 1,1638         | 1,0400          | 0,8685           | 0,7447           | 1,1638          | 1,0400          | 12 540    | 781,6   | 18,24          | 1,137          |
| 1 000       | 19,393          | 17,407          | 14,451           | 12,465           | 1,2089         | 1,0851          | 0,9008           | 0,7770           | 1,2089          | 1,0851          | 14 450    | 900,8   | 19,79          | 1,233          |
| 1 100       | 20,025          | 18,040          | 14,917           | 12,931           | 1,2483         | 1,1245          | 0,9299           | 0,8061           | 1,2483          | 1,1245          | 16 410    | 1 023   | 21,30          | 1,328          |
| 1 200       | 20,566          | 18,580          | 15,328           | 13,342           | 1,2820         | 1,1582          | 0,9555           | 0,8317           | 1,2820          | 1,1582          | 18 390    | 1 147   | 22,75          | 1,418          |

Этан  $C_2H_6$ 

| Темпе-<br>ратура | Теплоемкость   |                |                |              |              |              | Энтальпия    |              | Энтродия     |              |
|------------------|----------------|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                  |                |                |                |              |              |              | $\mu^l$      | $l$          | $\mu_s$      | $s$          |
|                  | $\mu_{C_2H_6}$ | $\mu_{C_2H_4}$ | $\mu_{C_2H_2}$ | $\mu_{CH_4}$ | $\mu_{H_2O}$ | $\mu_{CO_2}$ | ккал/кг      | ккал/кг      | ккал/кг·°К   | ккал/кг·°К   |
| $t$              | ккал/кг·град   |                |                |              |              |              | ккал/кг      | ккал/кг      | ккал/кг·°К   | ккал/кг·°К   |
| °С               | $\mu_{C_2H_6}$ | $\mu_{C_2H_4}$ | $\mu_{C_2H_2}$ | $\mu_{CH_4}$ | $\mu_{H_2O}$ | $\mu_{CO_2}$ | ккал/кг·град | ккал/кг·град | ккал/кг·град | ккал/кг·град |
| 0                | 11,830         | 9,844          | 11,830         | 9,844        | 0,3934       | 0,3274       | 0,3934       | 0,3274       | 0            | 0            |
| 100              | 14,849         | 12,863         | 13,356         | 11,370       | 0,4938       | 0,4278       | 0,4442       | 0,3781       | 1 336        | 44,42        |
| 200              | 17,883         | 15,897         | 14,855         | 12,869       | 0,5947       | 0,5287       | 0,4940       | 0,4280       | 2 971        | 98,80        |
| 300              | 20,610         | 18,624         | 16,297         | 14,311       | 0,6854       | 0,6194       | 0,5420       | 0,4759       | 4 889        | 162,6        |
| 400              | 23,081         | 21,095         | 17,713         | 15,727       | 0,7676       | 0,7016       | 0,5891       | 0,5230       | 7 085        | 235,6        |
| 500              | 25,271         | 23,285         | 19,019         | 17,033       | 0,8405       | 0,7744       | 0,6325       | 0,5665       | 9 500        | 316,2        |
| 600              | 27,197         | 25,211         | 20,224         | 18,238       | 0,9045       | 0,8385       | 0,6726       | 0,6066       | 12 130       | 403,6        |
| 700              | 28,885         | 26,899         | 21,342         | 19,356       | 0,9507       | 0,8946       | 0,7098       | 0,6437       | 14 940       | 496,9        |
| 800              | 30,275         | 28,289         | 22,383         | 20,397       | 1,0069       | 0,9408       | 0,7444       | 0,6784       | 17 910       | 595,5        |
| 900              | 31,519         | 29,533         | 23,351         | 21,365       | 1,0483       | 0,9822       | 0,7765       | 0,7106       | 21 020       | 698,8        |
| 1 000            | 32,653         | 30,677         | 24,249         | 22,263       | 1,0863       | 1,0202       | 0,8065       | 0,7404       | 24 250       | 806,5        |
| 1 100            | 33,703         | 31,717         | 25,075         | 23,089       | 1,1209       | 1,0548       | 0,8339       | 0,7679       | 27 580       | 917,3        |
| 1 200            | 34,642         | 32,656         | 25,834         | 23,848       | 1,1521       | 1,0861       | 0,8592       | 0,7931       | 31 000       | 1 031        |

Таблица 21

Значения характеристических температур для некоторых газов<sup>1</sup>

| Двухатомные     |          | Многоатомные     |            |            |            |
|-----------------|----------|------------------|------------|------------|------------|
| Газ             | $\Theta$ | Газ              | $\Theta_1$ | $\Theta_2$ | $\Theta_3$ |
| H <sub>2</sub>  | 6 130    | CO <sub>2</sub>  | 954 (2)    | 1 920      | 3 360      |
| Cl <sub>2</sub> | 801      | N <sub>2</sub> O | 842 (2)    | 1 840      | 3 190      |
| Br <sub>2</sub> | 461      | H <sub>2</sub> O | 2 280      | 5 150      | 5 360      |
| O <sub>2</sub>  | 2 224    | SO <sub>2</sub>  | 750        | 1 650      | 1 950      |
| N <sub>2</sub>  | 3 350    | NH <sub>3</sub>  | 1 360      | 2 330 (2)  | 4 470 (3)  |
| NO              | 2 705    | CH <sub>4</sub>  | 1 870 (3)  | 2 180 (3)  | 4 170 (2)  |
| CO              | 3 085    |                  |            |            | 4 820      |

<sup>1</sup> Данные заимствованы в [Л. 2].

Таблица 22

Величины  $C = \mu R \left( \frac{\Theta}{T} \right)^2 \frac{e^{\Theta/T}}{(e^{\Theta/T} - 1)^2}$ , ккал/кмоль·град  
для одномерного гармонического осциллятора

| $\Theta/T$ | $C$   | $\Theta/T$ | $C$   | $\Theta/T$ | $C$    |
|------------|-------|------------|-------|------------|--------|
| 0          | 1,986 | 1,45       | 1,673 | 3,70       | 0,707  |
| 0,10       | 1,983 | 1,50       | 1,659 | 3,80       | 0,672  |
| 0,15       | 1,981 | 1,55       | 1,633 | 3,90       | 0,637  |
| 0,20       | 1,979 | 1,60       | 1,612 | 4,00       | 0,604  |
| 0,25       | 1,976 | 1,65       | 1,592 | 4,20       | 0,542  |
| 0,30       | 1,974 | 1,70       | 1,570 | 4,40       | 0,484  |
| 0,35       | 1,967 | 1,75       | 1,549 | 4,60       | 0,431  |
| 0,40       | 1,960 | 1,80       | 1,527 | 4,80       | 0,383  |
| 0,45       | 1,952 | 1,85       | 1,505 | 5,00       | 0,339  |
| 0,50       | 1,945 | 1,90       | 1,483 | 5,20       | 0,300  |
| 0,55       | 1,938 | 1,95       | 1,461 | 5,40       | 0,262  |
| 0,60       | 1,928 | 2,00       | 1,439 | 5,60       | 0,232  |
| 0,65       | 1,918 | 2,10       | 1,393 | 5,80       | 0,204  |
| 0,70       | 1,908 | 2,20       | 1,348 | 6,00       | 0,178  |
| 0,75       | 1,896 | 2,30       | 1,302 | 6,40       | 0,136  |
| 0,80       | 1,884 | 2,40       | 1,256 | 6,80       | 0,103  |
| 0,85       | 1,871 | 2,50       | 1,210 | 7,20       | 0,077  |
| 0,90       | 1,858 | 2,60       | 1,164 | 7,60       | 0,057  |
| 0,95       | 1,844 | 2,70       | 1,119 | 8,00       | 0,0427 |
| 1,00       | 1,829 | 2,80       | 1,074 | 8,40       | 0,032  |
| 1,05       | 1,814 | 2,90       | 1,030 | 8,80       | 0,023  |
| 1,10       | 1,798 | 3,00       | 0,986 | 9,20       | 0,017  |
| 1,15       | 1,782 | 3,10       | 0,943 | 9,60       | 0,012  |
| 1,20       | 1,765 | 3,20       | 0,901 | 10,00      | 0,009  |
| 1,25       | 1,747 | 3,30       | 0,860 | 11,00      | 0,004  |
| 1,30       | 1,729 | 3,40       | 0,820 | 12,00      | 0,0017 |
| 1,35       | 1,711 | 3,50       | 0,781 | 13,00      | 0,0007 |
| 1,40       | 1,692 | 3,60       | 0,744 |            |        |

Таблица приведенных плотностей веществ

| $t_{кр}$ | Жидкость на линии насыщения |                              |                              |                              | $n = 1,0$   |                              |                              |                              |                              |                              | $n = 2,0$                    |  |  |
|----------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--|--|
|          | $\rho_{кр} = 0,23$          | $\rho_{кр} = 0,24 \div 0,26$ | $\rho_{кр} = 0,26 \div 0,28$ | $\rho_{кр} = 0,28 \div 0,30$ | Группа воды | $\rho_{кр} = 0,24 \div 0,26$ | $\rho_{кр} = 0,26 \div 0,28$ | $\rho_{кр} = 0,28 \div 0,30$ | $\rho_{кр} = 0,24 \div 0,26$ | $\rho_{кр} = 0,26 \div 0,28$ | $\rho_{кр} = 0,28 \div 0,30$ |  |  |
| 0,30     | —                           | 3,487                        | 3,287                        | 3,081                        | —           | 3,490                        | 3,290                        | 3,084                        | 3,494                        | 3,294                        | 3,088                        |  |  |
| 0,32     | —                           | 3,450                        | 3,253                        | 3,049                        | —           | 3,454                        | 3,256                        | 3,052                        | 3,260                        | 3,056                        |                              |  |  |
| 0,34     | —                           | 3,419                        | 3,223                        | 3,021                        | —           | 3,423                        | 3,227                        | 3,025                        | 3,231                        | 3,029                        |                              |  |  |
| 0,36     | —                           | 3,383                        | 3,189                        | 2,989                        | —           | 3,387                        | 3,193                        | 2,993                        | 3,392                        | 3,198                        |                              |  |  |
| 0,38     | —                           | 3,348                        | 3,156                        | 2,959                        | —           | 3,354                        | 3,162                        | 2,964                        | 3,358                        | 3,170                        |                              |  |  |
| 0,40     | —                           | 3,306                        | 3,118                        | 2,922                        | —           | 3,313                        | 3,123                        | 2,928                        | 3,322                        | 3,132                        |                              |  |  |
| 0,42     | 3,140                       | 3,271                        | 3,084                        | 2,891                        | 3,181       | 3,278                        | 3,090                        | 2,897                        | 3,287                        | 3,099                        |                              |  |  |
| 0,44     | 3,138                       | 3,234                        | 3,049                        | 2,858                        | 3,174       | 3,239                        | 3,054                        | 2,863                        | 3,251                        | 3,065                        |                              |  |  |
| 0,46     | 3,130                       | 3,195                        | 3,012                        | 2,824                        | 3,164       | 3,203                        | 3,020                        | 2,831                        | 3,215                        | 3,031                        |                              |  |  |
| 0,48     | 3,118                       | 3,156                        | 2,975                        | 2,789                        | 3,149       | 3,165                        | 2,984                        | 2,797                        | 3,177                        | 2,995                        |                              |  |  |
| 0,50     | 3,101                       | 3,115                        | 2,937                        | 2,753                        | 3,132       | 3,126                        | 2,947                        | 2,763                        | 3,136                        | 2,957                        |                              |  |  |
| 0,52     | 3,082                       | 3,076                        | 3,900                        | 2,719                        | 3,115       | 3,088                        | 2,911                        | 2,729                        | 3,099                        | 2,922                        |                              |  |  |
| 0,54     | 3,060                       | 3,036                        | 2,862                        | 2,683                        | 3,099       | 3,050                        | 2,875                        | 2,696                        | 3,063                        | 2,888                        |                              |  |  |
| 0,56     | 3,032                       | 2,996                        | 2,825                        | 2,648                        | 3,071       | 3,012                        | 2,840                        | 2,662                        | 3,028                        | 2,855                        |                              |  |  |
| 0,58     | 3,005                       | 2,956                        | 2,787                        | 2,613                        | 3,040       | 2,974                        | 2,800                        | 2,630                        | 2,990                        | 2,823                        |                              |  |  |
| 0,60     | 2,973                       | 2,913                        | 2,746                        | 2,574                        | 3,007       | 2,932                        | 2,764                        | 2,591                        | 2,952                        | 2,783                        |                              |  |  |
| 0,61     | 2,957                       | 2,893                        | 2,727                        | 2,556                        | 2,989       | 2,913                        | 2,746                        | 2,574                        | 2,936                        | 2,768                        |                              |  |  |
| 0,62     | 2,940                       | 2,868                        | 2,704                        | 2,535                        | 2,965       | 2,888                        | 2,723                        | 2,553                        | 2,916                        | 2,749                        |                              |  |  |

Продолжение табл. 23

| $z_{кр}$ | Жидкость из линии насыщения  |                              |                               |                                | $\pi=1,0$                    |                              |                               | $\pi=2,0$                      |                              |                               |                                |
|----------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
|          | $z_{кр}=0,23$<br>Группа воды | $z_{кр}=0,24 \div 0,26$<br>I | $z_{кр}=0,26 \div 0,28$<br>II | $z_{кр}=0,28 \div 0,30$<br>III | $z_{кр}=0,23$<br>Группа воды | $z_{кр}=0,24 \div 0,26$<br>I | $z_{кр}=0,26 \div 0,28$<br>II | $z_{кр}=0,28 \div 0,30$<br>III | $z_{кр}=0,24 \div 0,26$<br>I | $z_{кр}=0,26 \div 0,28$<br>II | $z_{кр}=0,28 \div 0,30$<br>III |
| 0,63     | 2,923                        | 2,849                        | 2,686                         | 2,518                          | 2,954                        | 2,868                        | 2,704                         | 2,535                          | 2,897                        | 2,731                         | 2,560                          |
| 0,64     | 2,904                        | 2,825                        | 2,663                         | 2,496                          | 2,938                        | 2,845                        | 2,682                         | 2,514                          | 2,877                        | 2,712                         | 2,542                          |
| 0,65     | 2,889                        | 2,800                        | 2,640                         | 2,475                          | 2,919                        | 2,824                        | 2,660                         | 2,494                          | 2,852                        | 2,689                         | 2,521                          |
| 0,66     | 2,868                        | 2,781                        | 2,622                         | 2,458                          | 2,900                        | 2,800                        | 2,640                         | 2,475                          | 2,836                        | 2,674                         | 2,507                          |
| 0,67     | 2,848                        | 2,757                        | 2,599                         | 2,436                          | 2,882                        | 2,784                        | 2,625                         | 2,461                          | 2,816                        | 2,655                         | 2,489                          |
| 0,68     | 2,827                        | 2,733                        | 2,577                         | 2,416                          | 2,864                        | 2,761                        | 2,603                         | 2,440                          | 2,797                        | 2,637                         | 2,472                          |
| 0,69     | 2,810                        | 2,709                        | 2,554                         | 2,394                          | 2,846                        | 2,737                        | 2,580                         | 2,419                          | 2,777                        | 2,618                         | 2,454                          |
| 0,70     | 2,785                        | 2,686                        | 2,532                         | 2,374                          | 2,828                        | 2,718                        | 2,562                         | 2,402                          | 2,757                        | 2,599                         | 2,436                          |
| 0,71     | 2,768                        | 2,661                        | 2,509                         | 2,352                          | 2,805                        | 2,693                        | 2,539                         | 2,380                          | 2,733                        | 2,577                         | 2,416                          |
| 0,72     | 2,741                        | 2,637                        | 2,486                         | 2,330                          | 2,782                        | 2,673                        | 2,520                         | 2,362                          | 2,711                        | 2,555                         | 2,395                          |
| 0,73     | 2,717                        | 2,614                        | 2,460                         | 2,310                          | 2,759                        | 2,650                        | 2,498                         | 2,342                          | 2,687                        | 2,533                         | 2,376                          |
| 0,74     | 2,693                        | 2,586                        | 2,438                         | 2,285                          | 2,736                        | 2,621                        | 2,471                         | 2,316                          | 2,662                        | 2,512                         | 2,351                          |
| 0,75     | 2,667                        | 2,557                        | 2,411                         | 2,260                          | 2,714                        | 2,598                        | 2,449                         | 2,296                          | 2,640                        | 2,490                         | 2,333                          |
| 0,76     | 2,643                        | 2,534                        | 2,389                         | 2,240                          | 2,690                        | 2,573                        | 2,426                         | 2,274                          | 2,620                        | 2,473                         | 2,317                          |
| 0,77     | 2,617                        | 2,505                        | 2,363                         | 2,215                          | 2,668                        | 2,546                        | 2,400                         | 2,250                          | 2,594                        | 2,445                         | 2,292                          |
| 0,78     | 2,593                        | 2,478                        | 2,336                         | 2,190                          | 2,644                        | 2,522                        | 2,378                         | 2,229                          | 2,571                        | 2,423                         | 2,271                          |
| 0,79     | 2,566                        | 2,450                        | 2,310                         | 2,168                          | 2,621                        | 2,494                        | 2,351                         | 2,204                          | 2,540                        | 2,400                         | 2,250                          |
| 0,80     | 2,535                        | 2,420                        | 2,284                         | 2,145                          | 2,597                        | 2,470                        | 2,329                         | 2,183                          | 2,524                        | 2,377                         | 2,230                          |
| 0,81     | 2,502                        | 2,390                        | 2,257                         | 2,121                          | 2,577                        | 2,446                        | 2,306                         | 2,150                          | 2,500                        | 2,354                         | 2,206                          |



| $\varphi_{кр}$ | Жидкость из линии насыщения                  |                           |                           |                           |                                              | $\pi=1,0$                         |                                    |                                     | $\pi=2,0$                         |                                    |                                     |
|----------------|----------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
|                | $\Gamma_{\text{ушла вода}}$<br>$z_{кр}=0,23$ | $z_{кр} = 0,26 \div 0,26$ | $z_{кр} = 0,26 \div 0,28$ | $z_{кр} = 0,28 \div 0,30$ | $\Gamma_{\text{ушла вода}}$<br>$z_{кр}=0,23$ | $1 \quad z_{кр} = 0,24 \div 0,26$ | $II \quad z_{кр} = 0,26 \div 0,28$ | $III \quad z_{кр} = 0,28 \div 0,30$ | $I \quad z_{кр} = 0,26 \div 0,28$ | $II \quad z_{кр} = 0,26 \div 0,28$ | $III \quad z_{кр} = 0,28 \div 0,30$ |
|                |                                              |                           |                           |                           |                                              |                                   |                                    |                                     |                                   |                                    |                                     |
| 0,82           | 2,478                                        | 2,359                     | 2,231                     | 2,096                     | 2,553                                        | 2,418                             | 2,280                              | 2,137                               | 2,472                             | 2,330                              | 2,183                               |
| 0,83           | 2,442                                        | 2,327                     | 2,201                     | 2,070                     | 2,526                                        | 2,387                             | 2,250                              | 2,109                               | 2,447                             | 2,306                              | 2,161                               |
| 0,84           | 2,407                                        | 2,295                     | 2,171                     | 2,044                     | 2,498                                        | 2,359                             | 2,224                              | 2,085                               | 2,420                             | 2,281                              | 2,137                               |
| 0,85           | 2,370                                        | 2,263                     | 2,141                     | 2,014                     | 2,468                                        | 2,327                             | 2,194                              | 2,057                               | 2,394                             | 2,256                              | 2,114                               |
| 0,86           | 2,340                                        | 2,227                     | 2,107                     | 1,984                     | 2,436                                        | 2,290                             | 2,161                              | 2,038                               | 2,368                             | 2,231                              | 2,098                               |
| 0,87           | 2,297                                        | 2,191                     | 2,077                     | 1,957                     | 2,402                                        | 2,253                             | 2,131                              | 2,002                               | 2,330                             | 2,204                              | 2,070                               |
| 0,88           | 2,266                                        | 2,155                     | 2,043                     | 1,925                     | 2,364                                        | 2,217                             | 2,098                              | 1,972                               | 2,302                             | 2,177                              | 2,049                               |
| 0,89           | 2,216                                        | 2,116                     | 2,006                     | 1,891                     | 2,324                                        | 2,179                             | 2,063                              | 1,941                               | 2,274                             | 2,150                              | 2,022                               |
| 0,90           | 2,191                                        | 2,076                     | 1,969                     | 1,859                     | 2,285                                        | 2,140                             | 2,027                              | 1,911                               | 2,243                             | 2,122                              | 1,998                               |
| 0,91           | 2,131                                        | 2,032                     | 1,932                     | 1,824                     | 2,232                                        | 2,094                             | 1,990                              | 1,877                               | 2,211                             | 2,092                              | 1,970                               |
| 0,92           | 2,077                                        | 1,989                     | 1,890                     | 1,789                     | 2,174                                        | 2,051                             | 1,948                              | 1,843                               | 2,180                             | 2,064                              | 1,943                               |
| 0,93           | 2,020                                        | 1,940                     | 1,846                     | 1,747                     | 2,113                                        | 2,000                             | 1,904                              | 1,802                               | 2,145                             | 2,033                              | 1,913                               |
| 0,94           | 1,965                                        | 1,888                     | 1,797                     | 1,707                     | 2,057                                        | 1,948                             | 1,855                              | 1,762                               | 2,104                             | 2,001                              | 1,887                               |
| 0,95           | 1,898                                        | 1,829                     | 1,745                     | 1,657                     | 1,994                                        | 1,889                             | 1,803                              | 1,713                               | 2,063                             | 1,965                              | 1,856                               |
| 0,96           | 1,784                                        | 1,765                     | 1,685                     | 1,605                     | 1,920                                        | 1,824                             | 1,743                              | 1,661                               | 2,028                             | 1,931                              | 1,825                               |
| 0,97           | 1,729                                        | 1,589                     | 1,617                     | 1,545                     | 1,850                                        | 1,740                             | 1,667                              | 1,594                               | 1,988                             | 1,892                              | 1,790                               |
| 0,98           | 1,628                                        | 1,508                     | 1,535                     | 1,459                     | 1,748                                        | 1,644                             | 1,580                              | 1,513                               | 1,946                             | 1,852                              | 1,755                               |
| 0,99           | 1,475                                        | 1,470                     | 1,420                     | 1,368                     | 1,624                                        | 1,450                             | 1,450                              | 1,397                               | 1,902                             | 1,810                              | 1,719                               |
| 1,00           | 1,000                                        | 1,000                     | 1,000                     | 1,000                     | 1,000                                        | 1,000                             | 1,000                              | 1,000                               | 1,854                             | 1,764                              | 1,776                               |

Свойства насыщенного ртутного пара

| $p, \text{ кг/см}^2$ | $t_s, ^\circ\text{C}$ | $h', \text{ ккал/кг}$ | $h'', \text{ ккал/кг}$ | $g, \text{ кг/кг}$ | $s', \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C}$ | $s'', \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C}$ | $v', \text{ м}^3/\text{кг}$ | $v'', \text{ м}^3/\text{кг}$ |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 0,0010               | 119,5                 | 3,96                  | 76,22                  | 72,26              | 0,0119                                     | 0,1959                                      | 0,0000752                   | 165,9                        |
| 0,002                | 134,6                 | 4,45                  | 76,61                  | 72,16              | 0,0132                                     | 0,1902                                      | 754                         | 86,16                        |
| 0,004                | 151,2                 | 4,98                  | 77,03                  | 72,05              | 0,0145                                     | 0,1843                                      | 756                         | 44,84                        |
| 0,006                | 161,5                 | 5,34                  | 77,32                  | 71,98              | 0,0152                                     | 0,1808                                      | 758                         | 30,52                        |
| 0,008                | 168,9                 | 5,58                  | 77,52                  | 71,94              | 0,0158                                     | 0,1785                                      | 759                         | 23,35                        |
| 0,010                | 175,0                 | 5,79                  | 77,69                  | 71,90              | 0,0163                                     | 0,1767                                      | 0,0000760                   | 18,94                        |
| 0,02                 | 195,0                 | 6,44                  | 78,20                  | 71,76              | 0,0178                                     | 0,1711                                      | 762                         | 9,893                        |
| 0,04                 | 216,9                 | 7,16                  | 78,78                  | 71,62              | 0,0193                                     | 0,1654                                      | 765                         | 5,178                        |
| 0,06                 | 230,9                 | 7,63                  | 79,16                  | 71,53              | 0,0202                                     | 0,1621                                      | 767                         | 3,550                        |
| 0,08                 | 241,0                 | 7,98                  | 79,44                  | 71,46              | 0,0208                                     | 0,1598                                      | 769                         | 2,716                        |
| 0,10                 | 249,6                 | 8,25                  | 79,66                  | 71,41              | 0,0213                                     | 0,1580                                      | 0,0000770                   | 2,209                        |
| 0,20                 | 277,3                 | 9,16                  | 80,38                  | 71,22              | 0,0231                                     | 0,1525                                      | 774                         | 1,163                        |
| 0,30                 | 294,4                 | 9,73                  | 80,84                  | 71,11              | 0,0241                                     | 0,1494                                      | 776                         | 0,7995                       |
| 0,40                 | 308,0                 | 10,18                 | 81,10                  | 71,01              | 0,0249                                     | 0,1471                                      | 778                         | 0,6140                       |
| 0,5                  | 318,8                 | 10,55                 | 81,49                  | 70,94              | 0,0255                                     | 0,1453                                      | 0,0000780                   | 0,5003                       |
| 0,6                  | 328,0                 | 10,86                 | 81,74                  | 70,88              | 0,0260                                     | 0,1439                                      | 781                         | 0,4234                       |
| 0,7                  | 335,9                 | 11,12                 | 81,94                  | 70,82              | 0,0265                                     | 0,1428                                      | 782                         | 0,3677                       |



## Свойства насыщенного пара аммиака

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{кг/см}^2$ | $v', \text{м}^3/\text{кг}$ | $v'', \text{м}^3/\text{кг}$ | $s', \text{ккал/кг}^\circ\text{C}$ | $s'', \text{ккал/кг}^\circ\text{C}$ | $i', \text{ккал/кг}$ | $i'', \text{ккал/кг}$ | $r, \text{ккал/кг}$ |
|---------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|
| -75                 | 0,0765              | 0,001368                   | 12,89                       | 0,6633                             | 2,4431                              | 20,9                 | 373,5                 | 352,6               |
| -70                 | 0,111               | 0,001379                   | 9,01                        | 0,6878                             | 2,4101                              | 25,9                 | 375,7                 | 349,8               |
| -65                 | 0,160               | 0,0013990                  | 6,46                        | 0,7123                             | 2,3794                              | 31,0                 | 377,9                 | 346,9               |
| -60                 | 0,223               | 0,001401                   | 4,70                        | 0,7366                             | 2,3504                              | 36,1                 | 380,0                 | 343,9               |
| -55                 | 0,308               | 0,001413                   | 3,49                        | 0,7601                             | 2,3233                              | 41,2                 | 382,1                 | 340,9               |
| -50                 | 0,417               | 0,001425                   | 2,62                        | 0,7832                             | 2,2978                              | 46,2                 | 384,1                 | 337,9               |
| -45                 | 0,557               | 0,001437                   | 2,01                        | 0,8065                             | 2,2738                              | 51,5                 | 386,1                 | 334,6               |
| -40                 | 0,732               | 0,001449                   | 1,55                        | 0,8295                             | 2,2510                              | 56,8                 | 388,1                 | 331,3               |
| -35                 | 0,951               | 0,001462                   | 1,22                        | 0,8520                             | 2,2294                              | 62,1                 | 390,0                 | 327,9               |
| -30                 | 1,219               | 0,001476                   | 0,963                       | 0,8742                             | 2,2090                              | 67,4                 | 391,9                 | 324,5               |
| -25                 | 1,546               | 0,001490                   | 0,772                       | 0,8960                             | 2,1896                              | 72,7                 | 393,7                 | 321,0               |
| -20                 | 1,940               | 0,001504                   | 0,624                       | 0,9174                             | 2,1710                              | 78,2                 | 395,5                 | 317,3               |
| -15                 | 2,410               | 0,001519                   | 0,509                       | 0,9385                             | 2,1532                              | 83,6                 | 397,1                 | 313,5               |
| -10                 | 2,966               | 0,001534                   | 0,419                       | 0,9593                             | 2,1362                              | 89,0                 | 398,7                 | 309,7               |
| -5                  | 3,619               | 0,001550                   | 0,347                       | 0,9798                             | 2,1199                              | 94,5                 | 400,1                 | 305,6               |
| 0                   | 4,379               | 0,001556                   | 0,290                       | 1,0000                             | 2,1041                              | 100,0                | 401,5                 | 301,5               |
| 5                   | 5,259               | 0,001583                   | 0,244                       | 1,0200                             | 2,0889                              | 105,5                | 402,8                 | 297,3               |
| 10                  | 6,271               | 0,001601                   | 0,206                       | 1,0397                             | 2,0741                              | 111,1                | 403,9                 | 292,8               |
| 15                  | 7,427               | 0,001619                   | 0,175                       | 1,0592                             | 2,0598                              | 116,7                | 405,0                 | 288,3               |
| 20                  | 8,741               | 0,001639                   | 0,149                       | 1,0785                             | 2,0459                              | 122,4                | 405,9                 | 283,5               |
| 25                  | 10,23               | 0,001659                   | 0,128                       | 1,0976                             | 2,0324                              | 128,1                | 406,8                 | 278,7               |
| 30                  | 11,90               | 0,001680                   | 0,111                       | 1,1165                             | 2,0191                              | 133,8                | 407,4                 | 273,6               |
| 35                  | 13,77               | 0,001702                   | 0,0959                      | 1,1352                             | 2,0061                              | 139,7                | 408,0                 | 268,3               |
| 40                  | 15,85               | 0,001726                   | 0,0833                      | 1,1538                             | 1,9933                              | 145,5                | 408,4                 | 262,9               |
| 45                  | 18,17               | 0,001750                   | 0,0727                      | 1,1722                             | 1,9807                              | 151,4                | 408,6                 | 257,2               |
| 50                  | 20,73               | 0,001777                   | 0,0635                      | 1,1904                             | 1,9681                              | 157,4                | 408,7                 | 251,3               |

Таблица насыщенных паров фреона-12

| Температура | t, °C | Давление абсолютное p, кг/см <sup>2</sup> | Удельный объем     |                              | Плотность                       |                             | Энтальпия            |                   | Теплота парообразования |                      | Энтропия                |                      | Отношение температур к абсолютной t, °K |
|-------------|-------|-------------------------------------------|--------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------------------------|
|             |       |                                           | жидкости v', кг/кг | пара v'', м <sup>3</sup> /кг | жидкости p', кг/дм <sup>3</sup> | пара p'', кг/м <sup>3</sup> | жидкости i', ккал/кг | пара i'', ккал/кг | жидкости r, ккал/кг     | пара s'', ккал/кг·°K | жидкости s', ккал/кг·°K | пара s'', ккал/кг·°K |                                         |
| -20         | 253,1 | 1,5396                                    | 0,6868             | 0,1107                       | 1,456                           | 9,034                       | 95,65                | 134,71            | 39,06                   | 0,98365              | 0,98365                 | 1,13798              | 0,15433                                 |
| -19         | 254,1 | 1,6005                                    | 0,6882             | 0,1067                       | 1,453                           | 9,372                       | 95,87                | 134,83            | 38,96                   | 0,98448              | 0,98448                 | 1,13783              | 0,15335                                 |
| -18         | 255,1 | 1,6627                                    | 0,6897             | 0,1030                       | 1,450                           | 9,709                       | 96,08                | 134,95            | 38,87                   | 0,98531              | 0,98531                 | 1,13768              | 0,15237                                 |
| -17         | 256,1 | 1,7275                                    | 0,6911             | 0,09938                      | 1,447                           | 10,06                       | 96,29                | 135,06            | 38,77                   | 0,98614              | 0,98614                 | 1,13753              | 0,15139                                 |
| -16         | 257,1 | 1,7940                                    | 0,6925             | 0,09597                      | 1,444                           | 10,42                       | 96,50                | 135,17            | 38,67                   | 0,98696              | 0,98696                 | 1,13738              | 0,15042                                 |
| -15         | 258,1 | 1,8622                                    | 0,6940             | 0,09268                      | 1,441                           | 10,79                       | 96,72                | 135,29            | 38,57                   | 0,98778              | 0,98778                 | 1,13723              | 0,14945                                 |
| -14         | 259,1 | 1,9321                                    | 0,6954             | 0,08952                      | 1,438                           | 11,17                       | 96,98                | 135,40            | 38,47                   | 0,98860              | 0,98860                 | 1,13709              | 0,14849                                 |
| -13         | 260,1 | 2,0050                                    | 0,6973             | 0,08650                      | 1,434                           | 11,56                       | 97,15                | 135,52            | 38,37                   | 0,98942              | 0,98942                 | 1,13695              | 0,14753                                 |
| -12         | 261,1 | 2,0793                                    | 0,6988             | 0,08361                      | 1,431                           | 11,96                       | 97,36                | 135,63            | 38,27                   | 0,99025              | 0,99025                 | 1,13682              | 0,14657                                 |
| -11         | 262,1 | 2,1555                                    | 0,7003             | 0,08082                      | 1,428                           | 12,37                       | 97,58                | 135,75            | 38,17                   | 0,99107              | 0,99107                 | 1,13668              | 0,14561                                 |
| -10         | 263,1 | 2,2342                                    | 0,7018             | 0,07813                      | 1,425                           | 12,80                       | 97,80                | 135,87            | 38,07                   | 0,99188              | 0,99188                 | 1,13657              | 0,14469                                 |
| -9          | 264,1 | 2,3148                                    | 0,7032             | 0,07558                      | 1,422                           | 13,23                       | 98,02                | 135,98            | 37,96                   | 0,99270              | 0,99270                 | 1,13644              | 0,14374                                 |
| -8          | 265,1 | 2,3984                                    | 0,7047             | 0,07313                      | 1,419                           | 13,68                       | 98,23                | 136,09            | 37,86                   | 0,99351              | 0,99351                 | 1,13633              | 0,14282                                 |
| -7          | 266,1 | 2,4833                                    | 0,7062             | 0,07078                      | 1,416                           | 14,13                       | 98,45                | 136,20            | 37,75                   | 0,99432              | 0,99432                 | 1,13620              | 0,14188                                 |
| -6          | 267,1 | 2,5712                                    | 0,7077             | 0,06852                      | 1,413                           | 14,60                       | 98,67                | 136,32            | 37,65                   | 0,99514              | 0,99514                 | 1,13609              | 0,14095                                 |
| -5          | 268,1 | 2,6602                                    | 0,7092             | 0,06635                      | 1,410                           | 15,08                       | 98,89                | 136,43            | 37,54                   | 0,99595              | 0,99595                 | 1,13598              | 0,14003                                 |
| -4          | 269,1 | 2,7531                                    | 0,7107             | 0,06427                      | 1,407                           | 15,57                       | 99,11                | 136,54            | 37,43                   | 0,99676              | 0,99676                 | 1,13586              | 0,13910                                 |

| Температура<br>$t, ^\circ\text{C}$ | Давление абсолют-<br>ное $P, \text{кг/см}^2$ | Удельный объем                      |                                  | Плотность                       |                              | Энтальпия                     |                            | Теплота парообра-<br>зования $r, \text{ккал/кг}$ | Энтропия<br>$\text{ккал/кг}^\circ\text{C}$ | Энтропия<br>пара $s'', \text{ккал/кг}^\circ\text{C}$ | Отношение теплоты<br>парообразования<br>к абсолютной тем-<br>пературе $T$ ,<br>$\text{ккал/кг}^\circ\text{C}$ |
|------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                    |                                              | жидкости $v', \text{м}^3/\text{кг}$ | пара $v'', \text{м}^3/\text{кг}$ | жидкости $\rho', \text{кг/м}^3$ | пара $\rho'', \text{кг/м}^3$ | жидкости $h', \text{ккал/кг}$ | пара $h'', \text{ккал/кг}$ |                                                  |                                            |                                                      |                                                                                                               |
| -3                                 | 2,8479                                       | 0,7127                              | 0,06226                          | 1,403                           | 16,07                        | 99,33                         | 136,65                     | 37,32                                            | 0,99757                                    | 1,13575                                              | 0,13818                                                                                                       |
| -2                                 | 2,9439                                       | 0,7143                              | 0,06028                          | 1,400                           | 16,59                        | 99,55                         | 136,77                     | 37,21                                            | 0,99839                                    | 1,13566                                              | 0,13727                                                                                                       |
| -1                                 | 3,0446                                       | 0,7158                              | 0,05844                          | 1,397                           | 17,11                        | 99,78                         | 136,88                     | 37,10                                            | 0,99919                                    | 1,13555                                              | 0,13636                                                                                                       |
| 0                                  | 3,1465                                       | 0,7173                              | 0,05667                          | 1,394                           | 17,63                        | 100,00                        | 136,99                     | 36,99                                            | 1,00000                                    | 1,13546                                              | 0,13546                                                                                                       |
| 1                                  | 3,2611                                       | 0,7189                              | 0,05496                          | 1,391                           | 18,20                        | 100,22                        | 137,10                     | 36,88                                            | 1,00081                                    | 1,13535                                              | 0,13454                                                                                                       |
| 2                                  | 3,3583                                       | 0,7205                              | 0,05330                          | 1,388                           | 18,76                        | 100,45                        | 137,21                     | 36,76                                            | 1,00161                                    | 1,13524                                              | 0,13363                                                                                                       |
| 3                                  | 3,4676                                       | 0,7220                              | 0,05168                          | 1,385                           | 19,35                        | 100,67                        | 137,32                     | 36,65                                            | 1,00242                                    | 1,13515                                              | 0,13273                                                                                                       |
| 4                                  | 3,5804                                       | 0,7241                              | 0,05012                          | 1,381                           | 19,95                        | 100,90                        | 137,43                     | 36,53                                            | 1,00322                                    | 1,13506                                              | 0,13184                                                                                                       |
| 5                                  | 3,6959                                       | 0,7267                              | 0,04863                          | 1,378                           | 20,56                        | 101,12                        | 137,54                     | 36,42                                            | 1,00402                                    | 1,13497                                              | 0,13095                                                                                                       |
| 6                                  | 3,8135                                       | 0,7273                              | 0,04721                          | 1,375                           | 21,18                        | 101,35                        | 137,65                     | 36,30                                            | 1,00483                                    | 1,13488                                              | 0,13005                                                                                                       |
| 7                                  | 3,9348                                       | 0,7289                              | 0,04583                          | 1,372                           | 21,82                        | 101,58                        | 137,76                     | 36,18                                            | 1,00563                                    | 1,13480                                              | 0,12917                                                                                                       |
| 8                                  | 4,0582                                       | 0,7310                              | 0,04450                          | 1,368                           | 22,47                        | 101,80                        | 137,86                     | 36,06                                            | 1,00643                                    | 1,13471                                              | 0,12828                                                                                                       |
| 9                                  | 4,1853                                       | 0,7326                              | 0,04323                          | 1,365                           | 23,13                        | 102,03                        | 137,97                     | 35,94                                            | 1,00723                                    | 1,13462                                              | 0,12739                                                                                                       |
| 10                                 | 4,3135                                       | 0,7342                              | 0,04204                          | 1,362                           | 23,79                        | 102,26                        | 138,08                     | 35,82                                            | 1,00803                                    | 1,13455                                              | 0,12652                                                                                                       |
| 11                                 | 4,4466                                       | 0,7358                              | 0,04086                          | 1,359                           | 24,48                        | 102,49                        | 138,18                     | 35,70                                            | 1,00883                                    | 1,13446                                              | 0,12563                                                                                                       |
| 12                                 | 4,5228                                       | 0,7380                              | 0,03970                          | 1,355                           | 25,19                        | 102,72                        | 138,29                     | 35,57                                            | 1,00963                                    | 1,13439                                              | 0,12476                                                                                                       |
| 13                                 | 4,7209                                       | 0,7396                              | 0,03858                          | 1,352                           | 25,92                        | 102,95                        | 138,39                     | 35,44                                            | 1,01042                                    | 1,13430                                              | 0,12388                                                                                                       |
| 14                                 | 4,8521                                       | 0,7413                              | 0,03751                          | 1,349                           | 26,66                        | 103,18                        | 138,49                     | 35,31                                            | 1,01122                                    | 1,13422                                              | 0,12300                                                                                                       |
| 15                                 | 5,0076                                       | 0,7435                              | 0,03648                          | 1,345                           | 27,41                        | 103,42                        | 138,61                     | 35,19                                            | 1,01201                                    | 1,13414                                              | 0,12213                                                                                                       |

| Температура |          | Давление абсолют-<br>ное $p$ , кг/см <sup>2</sup> | Удельный объем                         |                                    | Плотность                                |                                      | Энтальпия                  |                         | Теплота парообра-<br>зования $r$ , ккал/кг | Энтропия                      |                            | Отношение теплоты<br>к абсолютной тем-<br>пературе $T$ ,<br>ккал/кг·°К |
|-------------|----------|---------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| $t$ , °C    | $T$ , °K |                                                   | жидкости $v'$ ,<br>см <sup>3</sup> /кг | пара $v''$ ,<br>м <sup>3</sup> /кг | жидкости $\rho'$ ,<br>кг/см <sup>3</sup> | пара $\rho''$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | жидкости $h'$ ,<br>ккал/кг | пара $h''$ ,<br>ккал/кг |                                            | жидкости $s'$ ,<br>ккал/кг·°К | пара $s''$ ,<br>ккал/кг·°К |                                                                        |
| 16          | 289,1    | 5,1550                                            | 0,7452                                 | 0,03547                            | 1,342                                    | 28,19                                | 103,65                     | 138,70                  | 35,05                                      | 1,01281                       | 1,13407                    | 0,12126                                                                |
| 17          | 290,1    | 5,3067                                            | 0,7468                                 | 0,03449                            | 1,339                                    | 28,99                                | 103,88                     | 138,81                  | 34,93                                      | 1,01361                       | 1,13400                    | 0,12039                                                                |
| 18          | 291,1    | 5,4605                                            | 0,7491                                 | 0,03354                            | 1,335                                    | 29,87                                | 104,12                     | 138,91                  | 34,79                                      | 1,01440                       | 1,13392                    | 0,11952                                                                |
| 19          | 292,1    | 5,6172                                            | 0,7507                                 | 0,03283                            | 1,332                                    | 30,65                                | 104,35                     | 139,01                  | 34,66                                      | 1,01519                       | 1,13385                    | 0,11886                                                                |
| 20          | 293,1    | 5,7786                                            | 0,7524                                 | 0,03175                            | 1,329                                    | 31,50                                | 104,59                     | 139,12                  | 34,53                                      | 1,01598                       | 1,13378                    | 0,11780                                                                |
| 21          | 294,1    | 5,9432                                            | 0,7547                                 | 0,03089                            | 1,325                                    | 32,38                                | 104,82                     | 139,21                  | 34,39                                      | 1,01678                       | 1,13372                    | 0,11694                                                                |
| 22          | 295,1    | 6,1112                                            | 0,7570                                 | 0,03005                            | 1,321                                    | 33,28                                | 105,06                     | 139,31                  | 34,25                                      | 1,01757                       | 1,13364                    | 0,11607                                                                |
| 23          | 296,1    | 6,2825                                            | 0,7587                                 | 0,02925                            | 1,318                                    | 34,19                                | 105,29                     | 139,40                  | 34,11                                      | 1,01835                       | 1,13356                    | 0,11521                                                                |
| 24          | 297,1    | 6,4584                                            | 0,7605                                 | 0,02848                            | 1,315                                    | 35,11                                | 105,53                     | 139,50                  | 33,97                                      | 1,01914                       | 1,13350                    | 0,11436                                                                |
| 25          | 298,1    | 6,6363                                            | 0,7628                                 | 0,02773                            | 1,311                                    | 36,07                                | 105,77                     | 139,61                  | 33,84                                      | 1,01993                       | 1,13344                    | 0,11351                                                                |
| 26          | 299,1    | 6,8175                                            | 0,7645                                 | 0,02700                            | 1,308                                    | 37,04                                | 106,01                     | 139,70                  | 33,69                                      | 1,02072                       | 1,13337                    | 0,11265                                                                |
| 27          | 300,1    | 7,0020                                            | 0,7669                                 | 0,02529                            | 1,304                                    | 38,04                                | 106,25                     | 139,79                  | 33,54                                      | 1,02151                       | 1,13329                    | 0,11178                                                                |
| 28          | 301,1    | 7,1933                                            | 0,7692                                 | 0,02550                            | 1,300                                    | 39,06                                | 106,49                     | 139,89                  | 33,40                                      | 1,02229                       | 1,13322                    | 0,11093                                                                |
| 29          | 302,1    | 7,3863                                            | 0,7710                                 | 0,02494                            | 1,297                                    | 40,10                                | 106,73                     | 139,98                  | 33,25                                      | 1,02307                       | 1,13315                    | 0,11008                                                                |
| 30          | 303,1    | 7,5810                                            | 0,7734                                 | 0,02433                            | 1,293                                    | 41,11                                | 106,97                     | 140,08                  | 33,11                                      | 1,02387                       | 1,13310                    | 0,10923                                                                |
| 31          | 304,1    | 7,7826                                            | 0,7758                                 | 0,02371                            | 1,289                                    | 42,18                                | 107,21                     | 140,16                  | 32,95                                      | 1,02465                       | 1,13301                    | 0,10836                                                                |
| 32          | 305,1    | 7,9897                                            | 0,7782                                 | 0,02309                            | 1,285                                    | 43,31                                | 107,45                     | 140,25                  | 32,80                                      | 1,02543                       | 1,13294                    | 0,10751                                                                |
| 33          | 306,1    | 8,2003                                            | 0,7800                                 | 0,02250                            | 1,282                                    | 44,45                                | 107,69                     | 140,34                  | 32,65                                      | 1,02620                       | 1,13286                    | 0,10666                                                                |
| 34          | 307,1    | 8,4087                                            | 0,7825                                 | 0,02192                            | 1,278                                    | 45,62                                | 107,94                     | 140,43                  | 32,49                                      | 1,02699                       | 1,13280                    | 0,10581                                                                |

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андриященко А. И., Термодинамические расчеты оптимальных параметров тепловых электростанций, «Высшая школа», 1963
2. Бродский А. И., Физическая химия, Госхимиздат, 1948
3. Всесоюзный теплотехнический институт, Таблицы термодинамических свойств газов, Госэнергоиздат, 1953.
4. Вукалович М. П., Термодинамические свойства воды и водяного пара, Машгиз — Verlag Technik, 1958.
5. Вукалович М. П., Дзампов Б. В., Зубарев В. Н., «Теплоэнергетика», 1960, № 2
6. Вукалович М. П., Кириллин В. А., Ремизов С. А., Силецкий В. С., Тимофеев В. Н., Термодинамические свойства газов, Машгиз, 1953.
7. Вукалович М. П., Новиков И. И., Техническая термодинамика, Госэнергоиздат, 1962.
8. ГОСТ 9867-61. Международная система единиц
9. ГОСТ 7664-61. Механические единицы.
10. ГОСТ 8550-61. Тепловые единицы.
11. Дейч М. Е., Техническая газодинамика, Госэнергоиздат, 1953.
12. Зубарев В. Н., Маркин В. А., «Теплоэнергетика», 1961, № 7.
13. Зыкин В. А., Комбинированные парогазовые установки и циклы, Госэнергоиздат, 1962.
14. Калафати Д. Д., Регенеративные циклы паросиловых установок, МЭИ, 1954.
15. Карапетьянц М. Х., Химическая термодинамика, Госхимиздат, 1953.
16. Кириллин В. А., Шейдлин А. Е., Шпильрайн Э. Э., Задачник по технической термодинамике, Госэнергоиздат, 1957.
17. Михеев М. А., Основы теплопередачи, Госэнергоиздат, 1958.